




**Pleins feux  
Sur  
la matière noire**

Nathalie Palanque-Delabrouille  
CEA Saclay

Festival d'astronomie de Fleurance

Août 2017

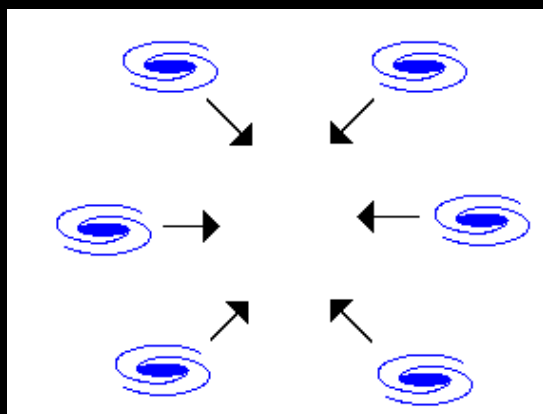
# Pleins feux sur la matière noire



- Les faits historiques
- Les pistes  
espoirs et déconvenues ...
- Température de la matière noire
- Solution législative

# Années 1930

## Fritz Zwicky, 1933



# Années 1930

## Vitesse de libération (surface de l'astre)

Lune	1 km/s	1% $M_{\text{Terre}}$
Terre	11 km/s	$6 \cdot 10^{24}$ kg
Soleil	620 km/s	$2 \cdot 10^{30}$ kg



Masse  $\longleftrightarrow$  vitesse

# Années 1930

## Vitesse de libération (surface de l'astre)

Lune	1 km/s	1% $M_{\text{Terre}}$
Terre	11 km/s	$6 \cdot 10^{24}$ kg
Soleil	620 km/s	$2 \cdot 10^{30}$ kg

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

*par conservation énergie mécanique*

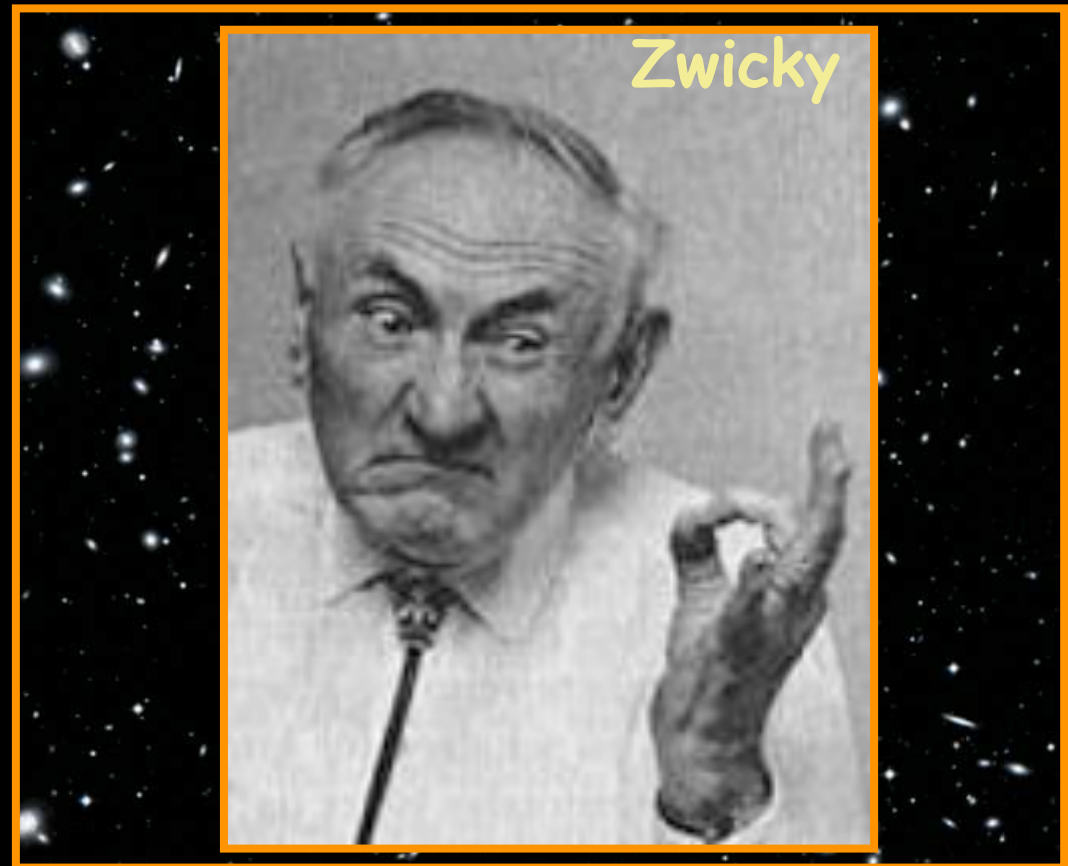


# Années 1930

## Dispersion des vitesses des galaxies dans amas de Coma

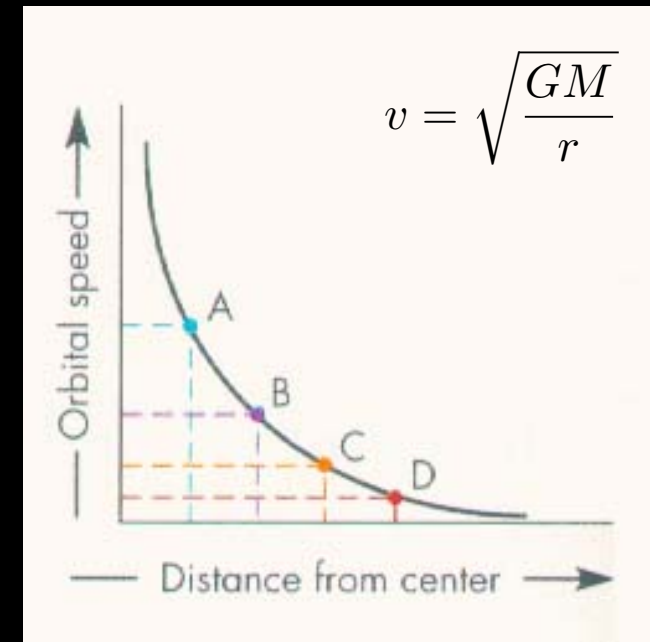
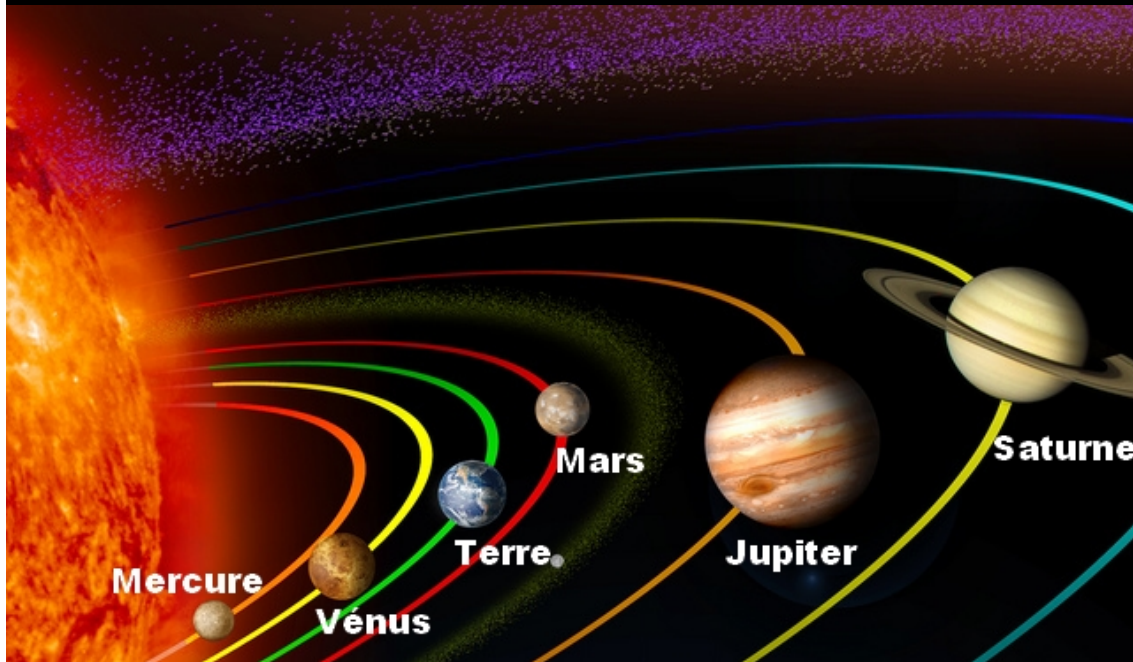
Prédites	80 km/s
Mesurées	1020 km/s

Amas de Coma  
> 100 fois plus lourd  
que ses galaxies !



# 1970 : Peser les galaxies ...

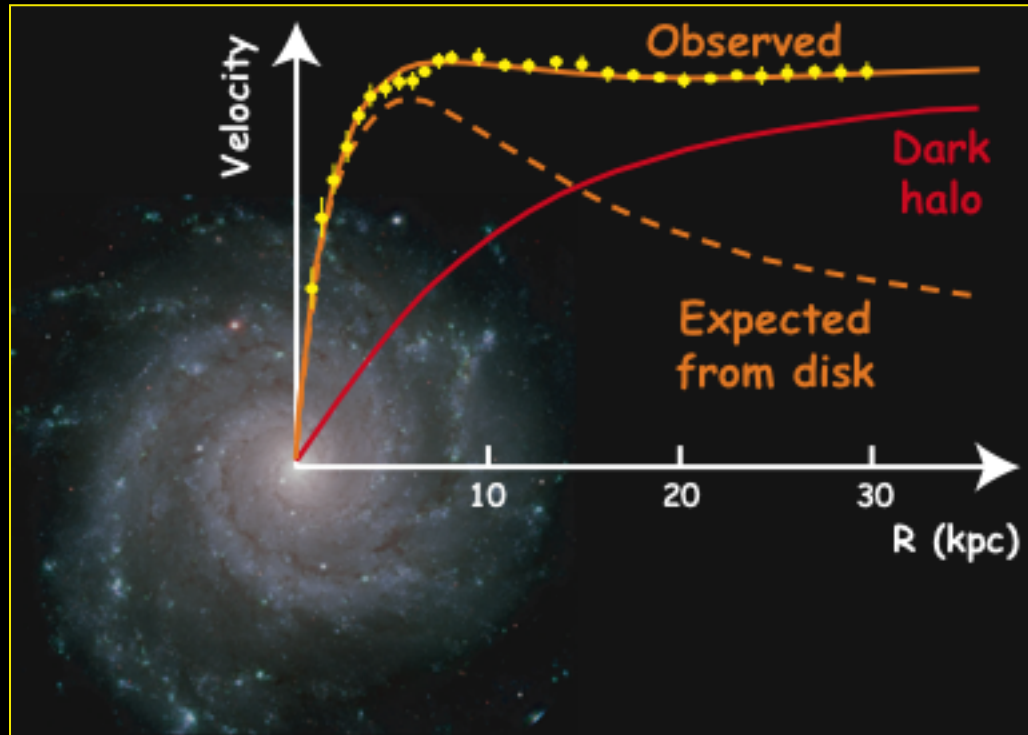
Des planètes pour peser le soleil



la **vitesse** croît  
quand la **masse** augmente

la **vitesse** décroît  
quand la **distance** augmente

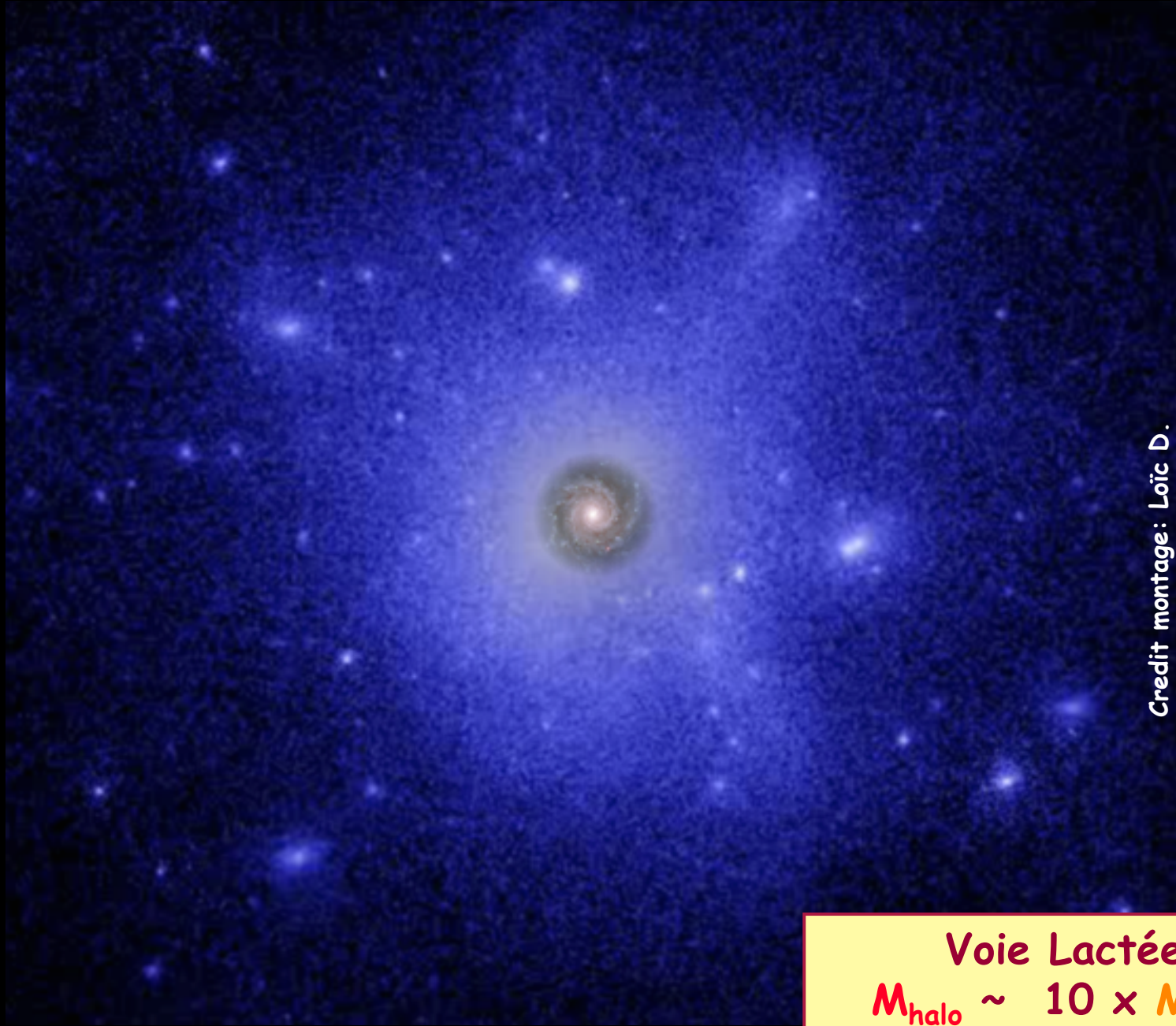
# 1970 : Peser les galaxies ...



Vera Rubin

Rotation à vitesse constante → Halo de MATIÈRE NOIRE





Credit montage: Loïc D.

Voie Lactée:  
 $M_{\text{halo}} \sim 10 \times M_{\text{visible}}$

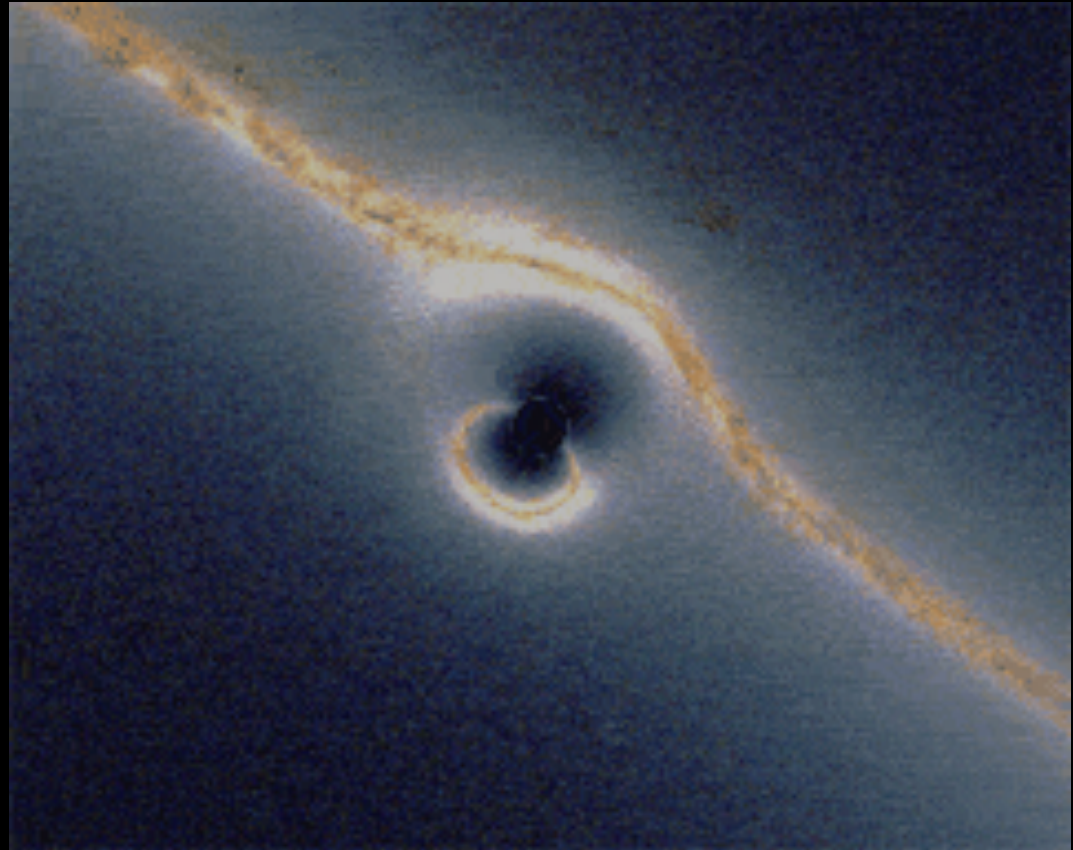
# 1990 : ... ou les amas de galaxies

Lentilles  
gravitationnelles



# 1990 : ... ou les amas de galaxies

**Lentilles  
gravitationnelles**



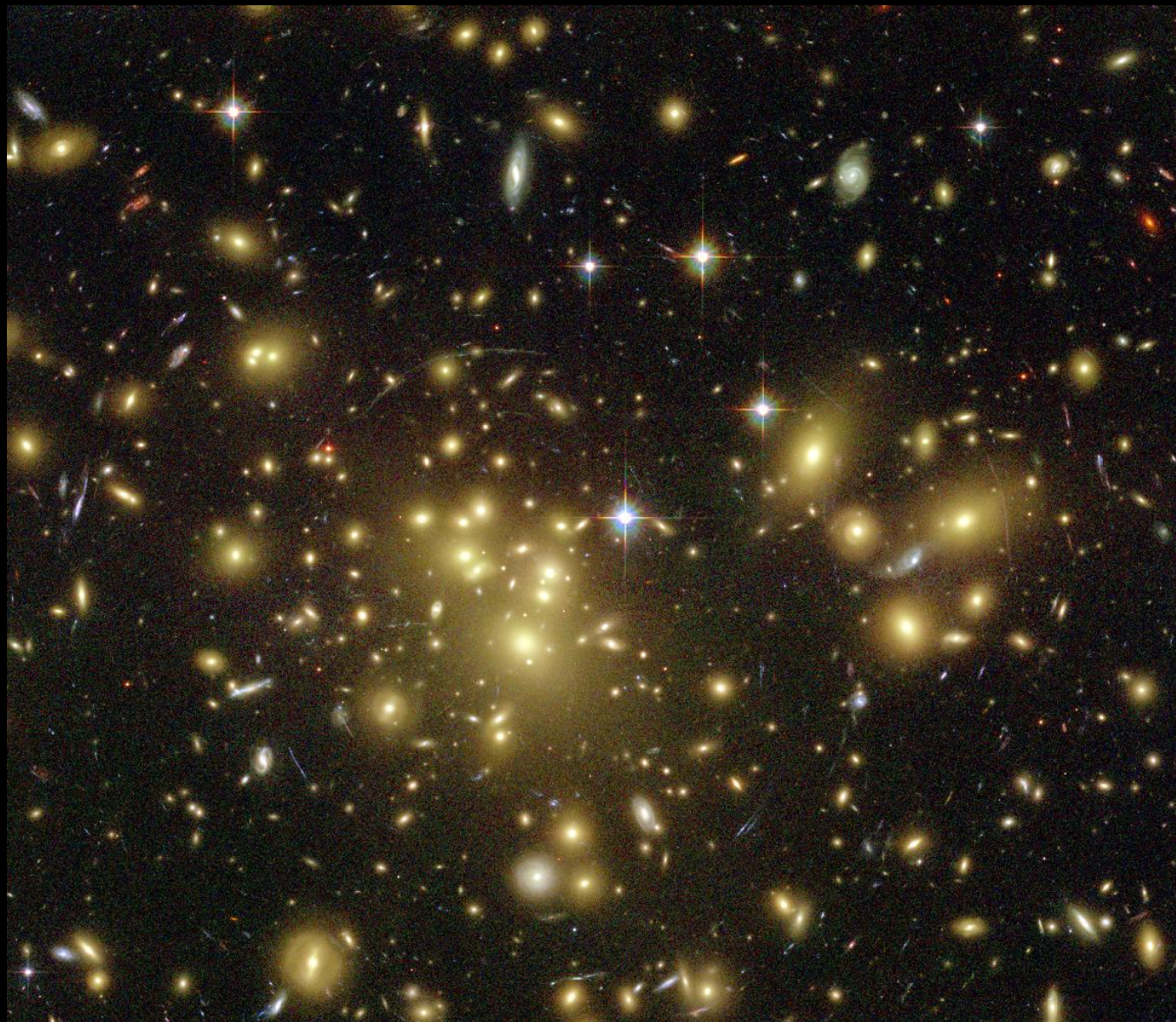
# 1990 : ... ou les amas de galaxies

Lentilles  
gravitationnelles



**A 2218**

A 1689



Masse lumineuse = 1% Masse gravitationnelle

du  
gaz ?



A 1689

en optique

en  
rayons X

$m_x \sim 10 \times m_{vis}$

mais pas assez

Comprendre notre univers,  
expliquer les observations

exige

de la

**matière  
extra-ordinaire**

# De la matière pas ordinaire

13,7  
milliards  
ans

380 000  
ans

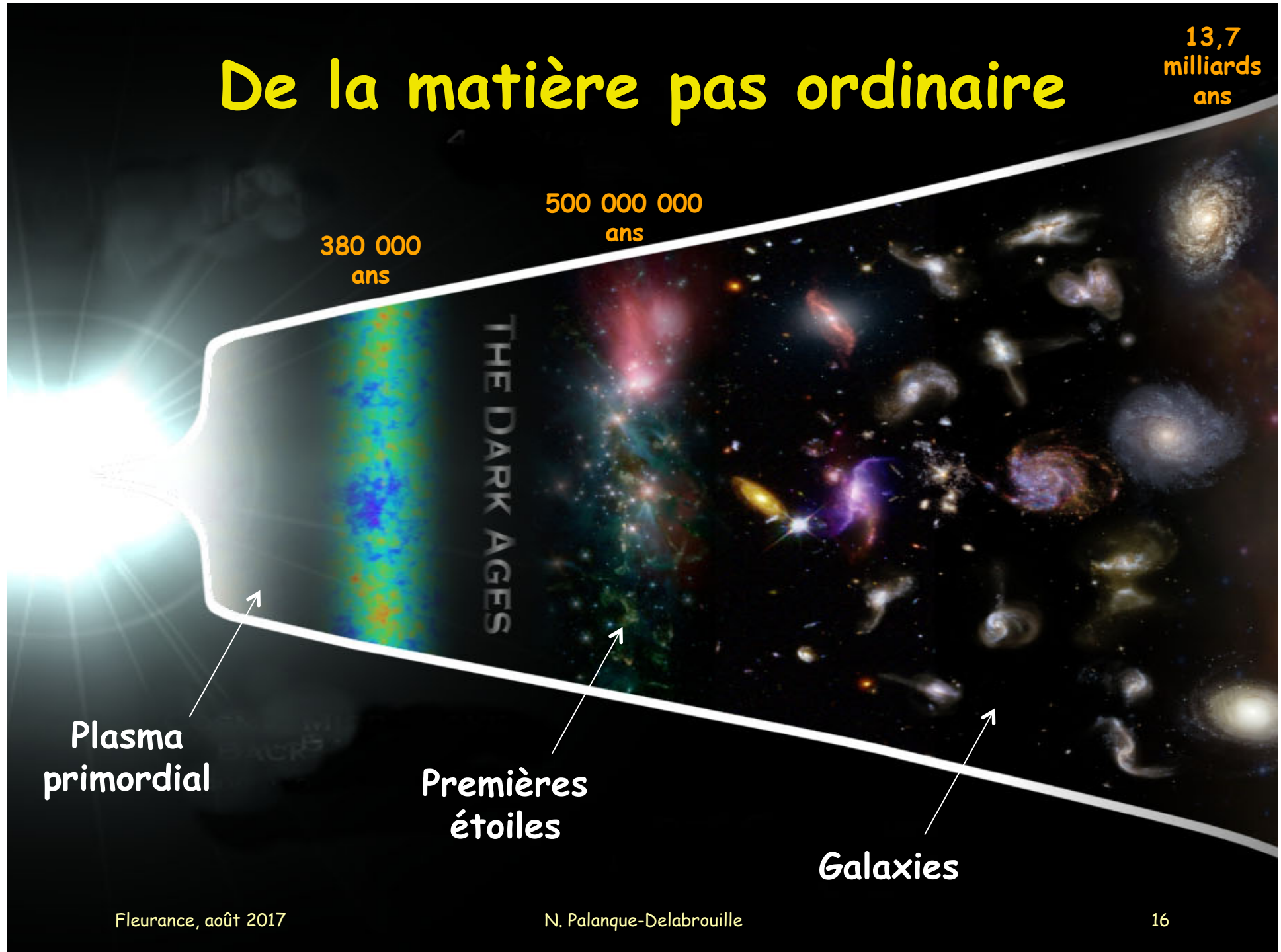
500 000 000  
ans

THE DARK AGES

Plasma  
primordial

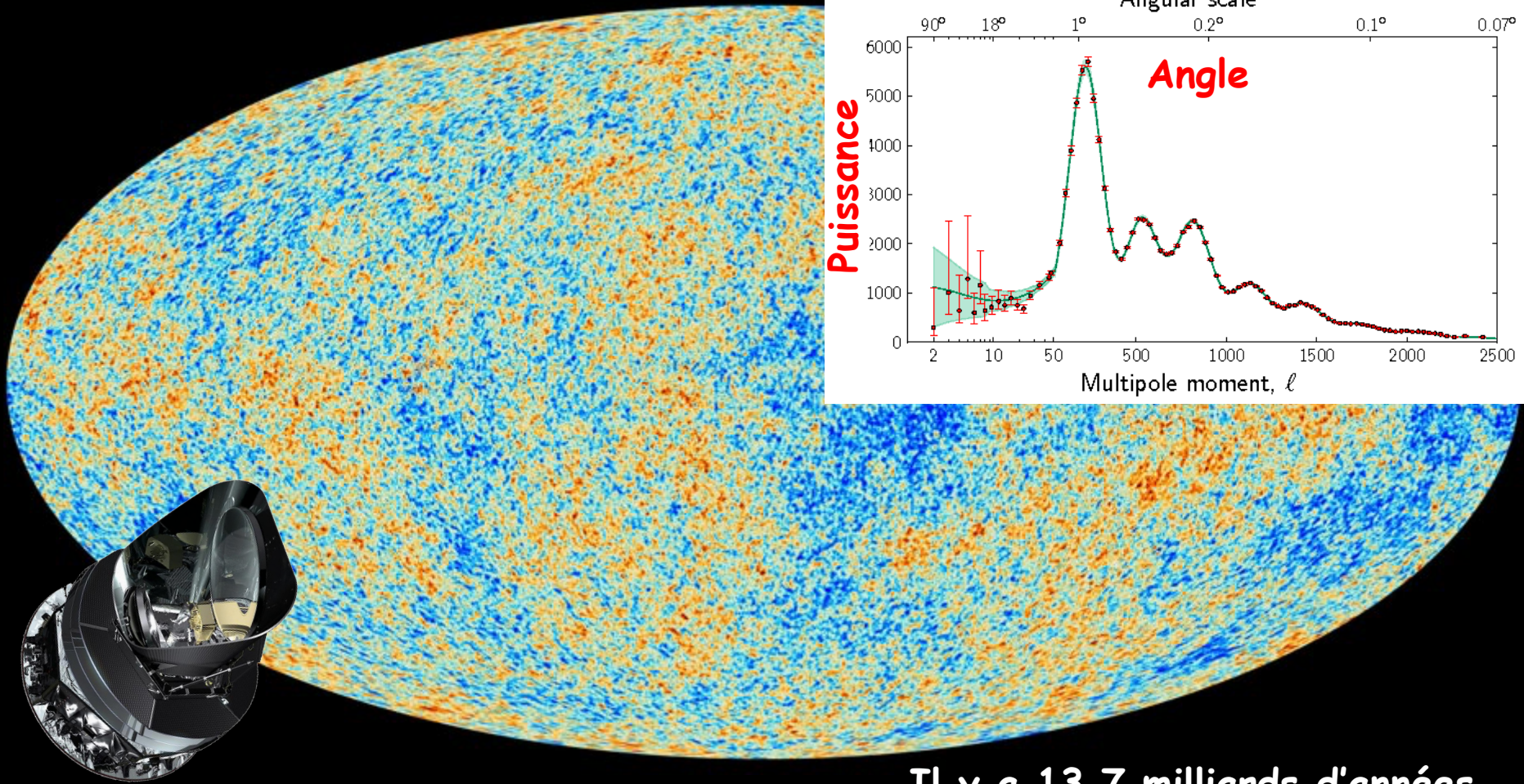
Premières  
étoiles

Galaxies





# De la matière pas ordinaire

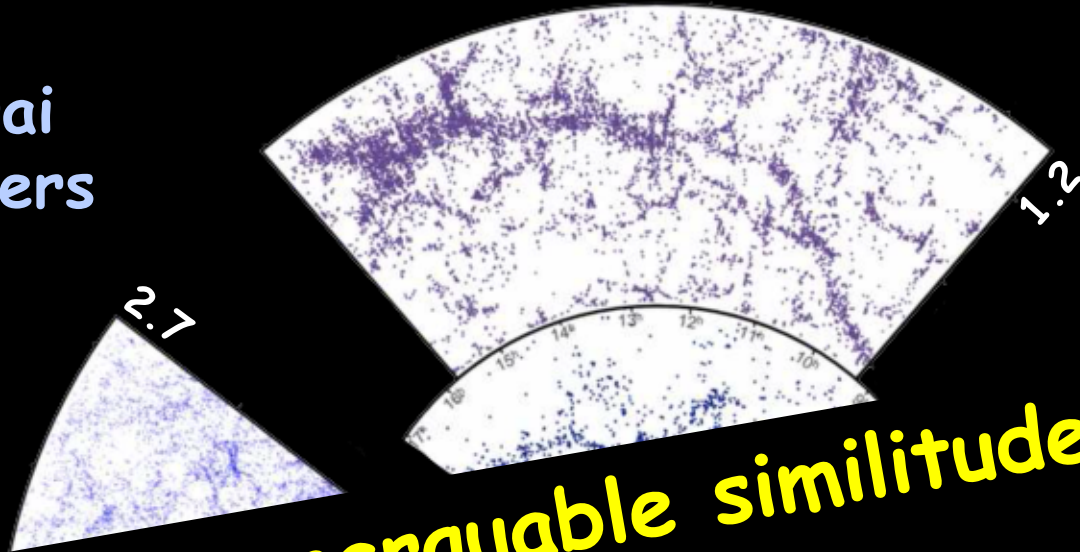


Il y a 13,7 milliards d'années,  
quand l'univers avait 380 000 ans

# De la matière pas ordinaire

# De la matière pas ordinaire

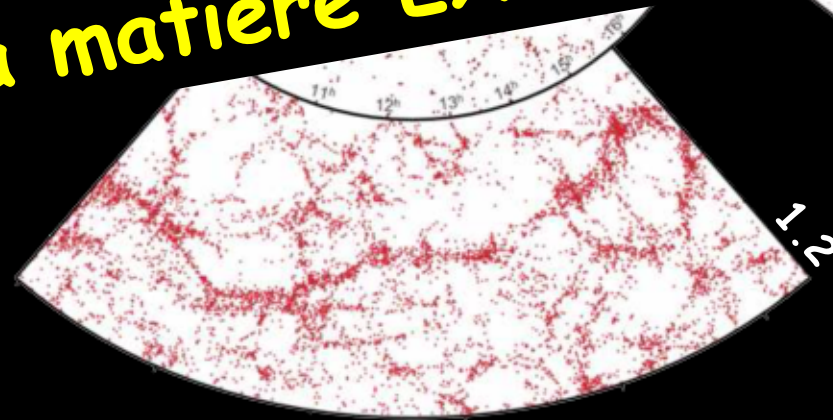
Vrai univers



Temps  
(compte à rebours)  
en milliards d'années

Remarquable similitude

A CONDITION d'inclure  
de la matière EXTRA-ordinaire



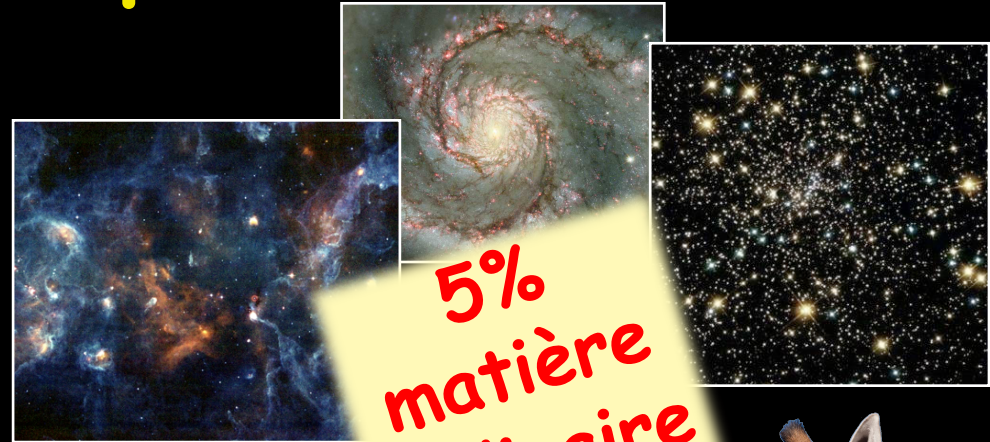
Simulations

# De la matière pas ordinaire

Modèle



Observations  
cosmologiques



5%  
matière  
ordinaire  
lumineuse

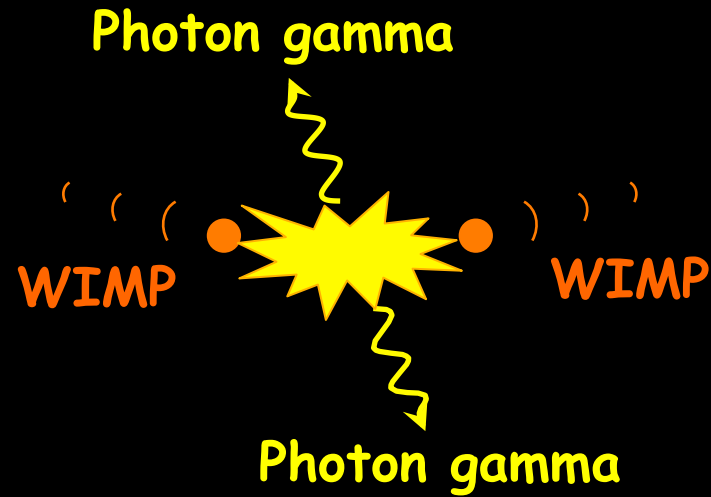


95%  
matière noire

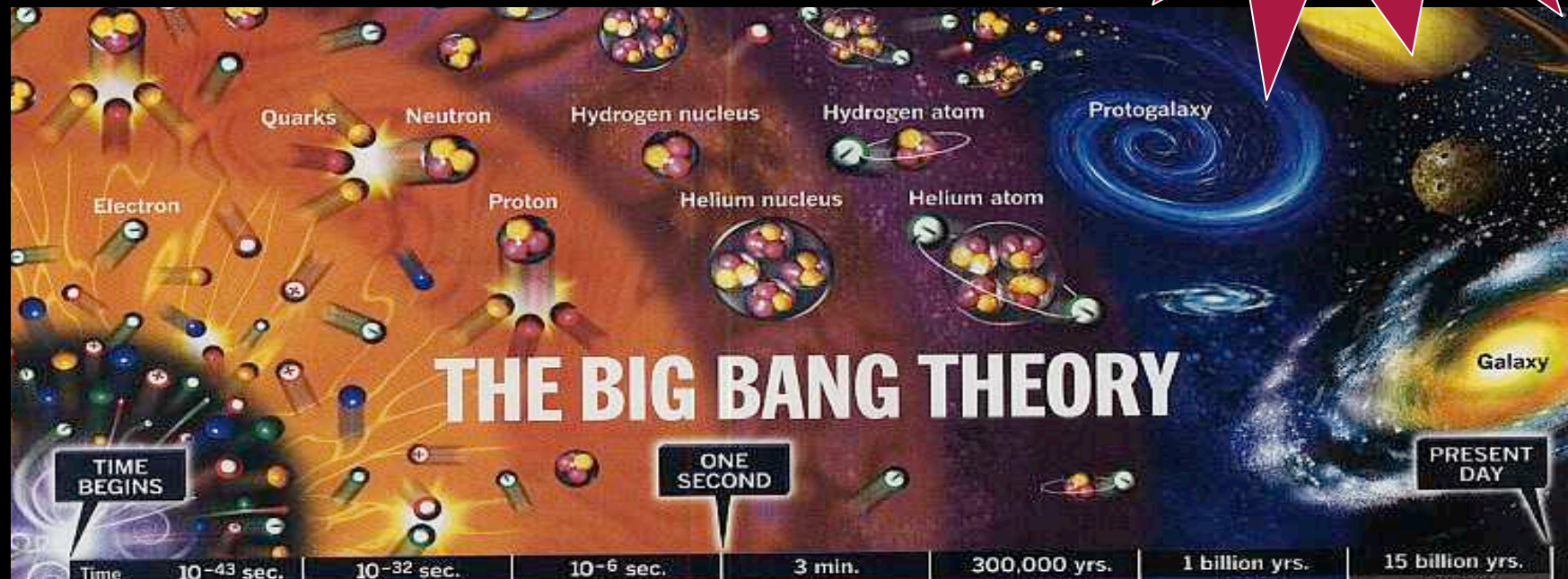
# Pleins feux sur la matière noire

- Les faits historiques
- Les pistes  
espoirs et déconvenues ...
- Température de la matière noire
- Solution législative

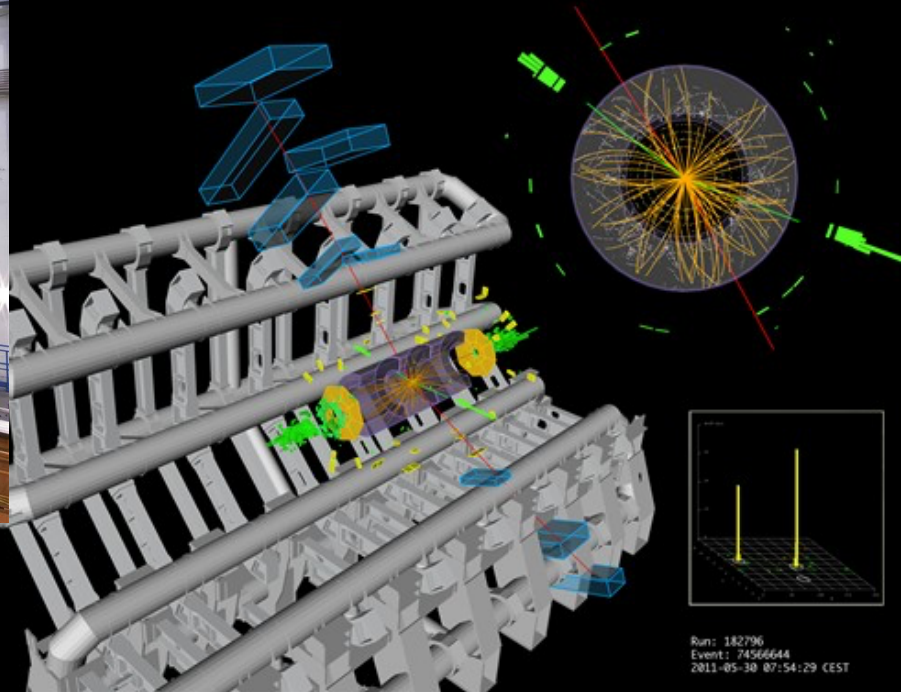
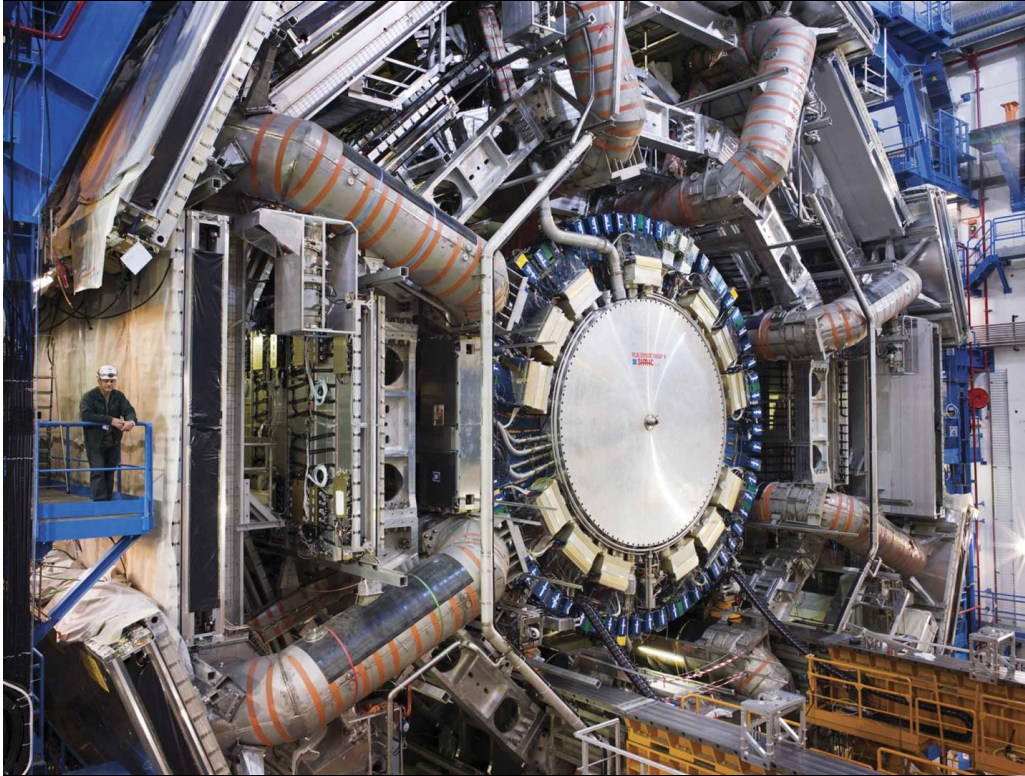
# Le miracle WIMP



Aujourd'hui  
il reste(rait)  
des WIMPs !



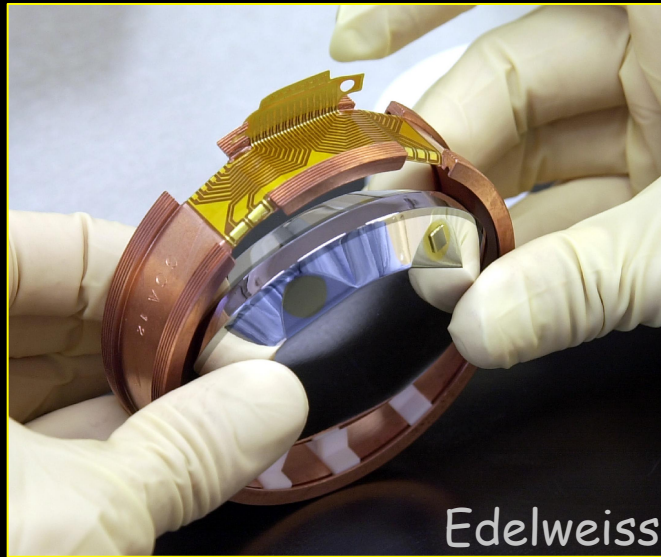
# Produire des WIMPs ?



Au LHC (CERN) depuis 2008  
Découverte du Higgs, mais point de WIMP



# Détecter des WIMPs ?



Interaction d'un WIMP  
dans cristal de Germanium ultra pur

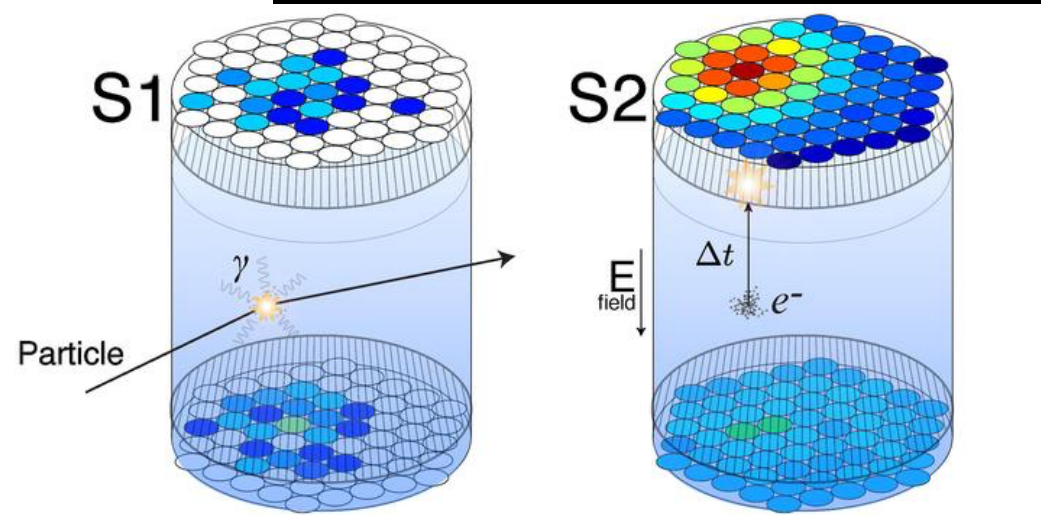
- **Élévation de température**  
de **1 millionième** de degré
- **Signal électrique (faible)**  
3 fois plus petit que pour radioactivité

Labo de Modane:  
1700 m de profondeur

**Pas le moindre WIMP à ce jour**



# Détecter des WIMPs ?



Par 1510 m de profondeur  
(mine au Dakota du Sud, USA)

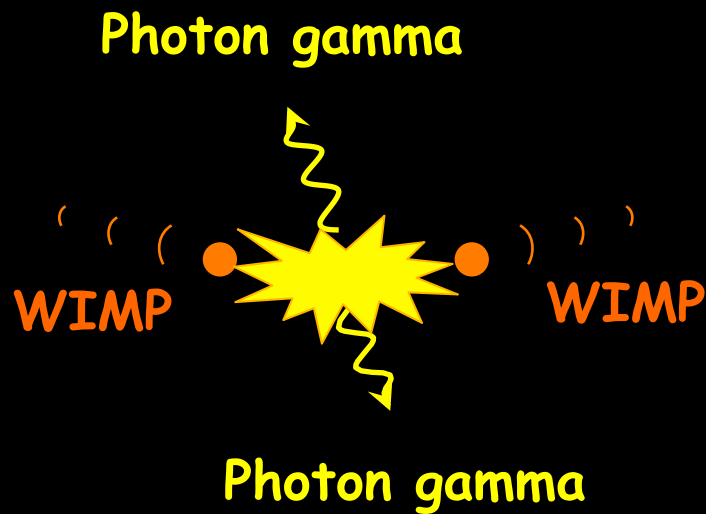
Choc d'un WIMP  
dans 400 kg de gaz noble (Xe, Ar)

→ **Double signal**  
lumière + électroluminescence

# Pleins feux sur la matière noire

- Les faits historiques
- Les pistes  
espoirs et déconvenues ...
- La matière noire tiède
- Solution législative

# Détecter l'ombre de WIMPs



Faut grande densité  
de matière



Centre de galaxies

# Détecter l'ombre de WIMPs

Satellite Fermi  
(NASA)

Lancé en 2008

Détecteur de  
rayons gamma

(20 MeV - 300 GeV)

# Détecter l'ombre de WIMPs

Vers le centre de la Voie Lactée

Fleurance, août 2017

N. Palanque-Delabrouille

EricHinesPhotography

30

# Détecter l'ombre de WIMPs

Vers le centre de la Voie Lactée

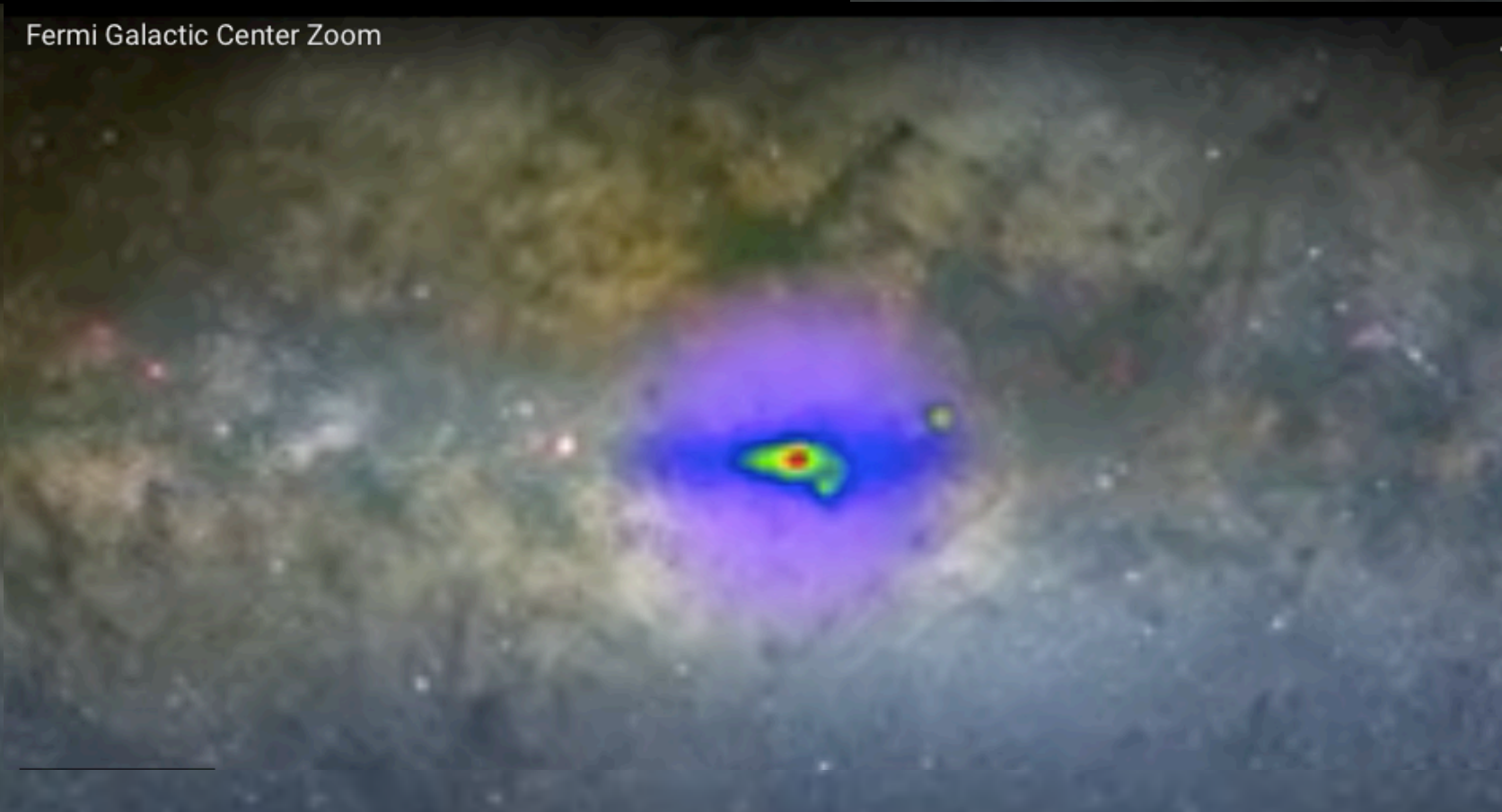


Optique

# Détecter l'ombre de WIMPs

## Vers le centre de la Voie Lactée

Fermi Galactic Center Zoom



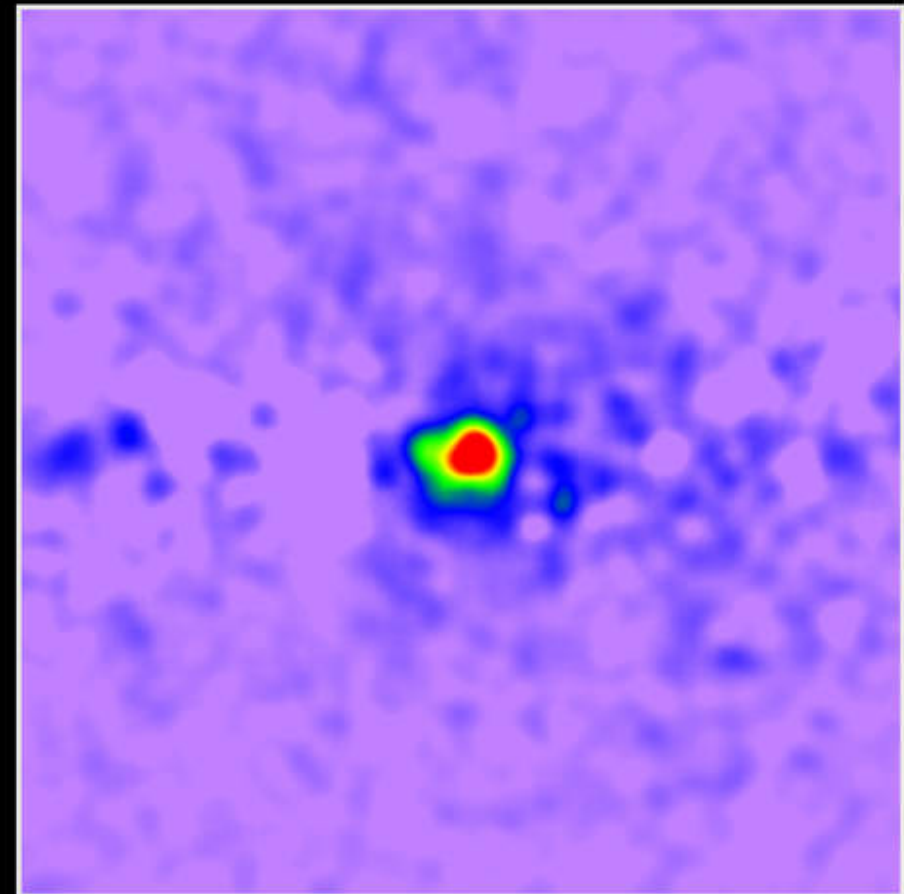
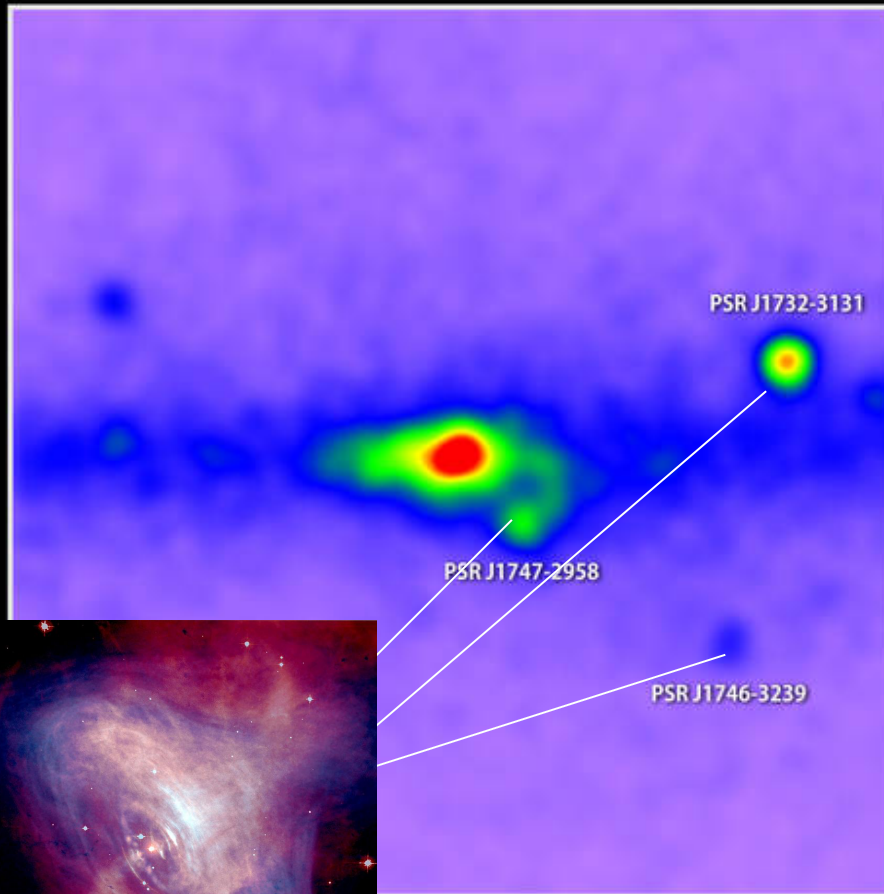
Optique

Gamma

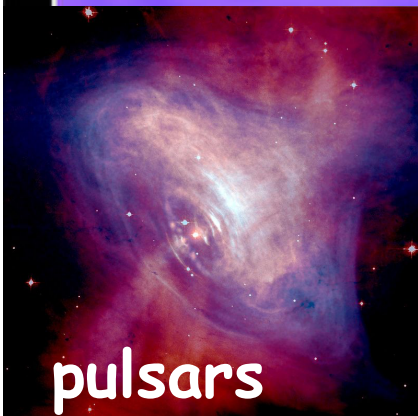


# Détecter l'ombre de WIMPs

Uncovering a gamma-ray excess at the galactic center



Known sources removed



pulsars

Fleurance, août 2017

N. Palanque-Delabrouille

33

# Détecter l'ombre de WIMPs

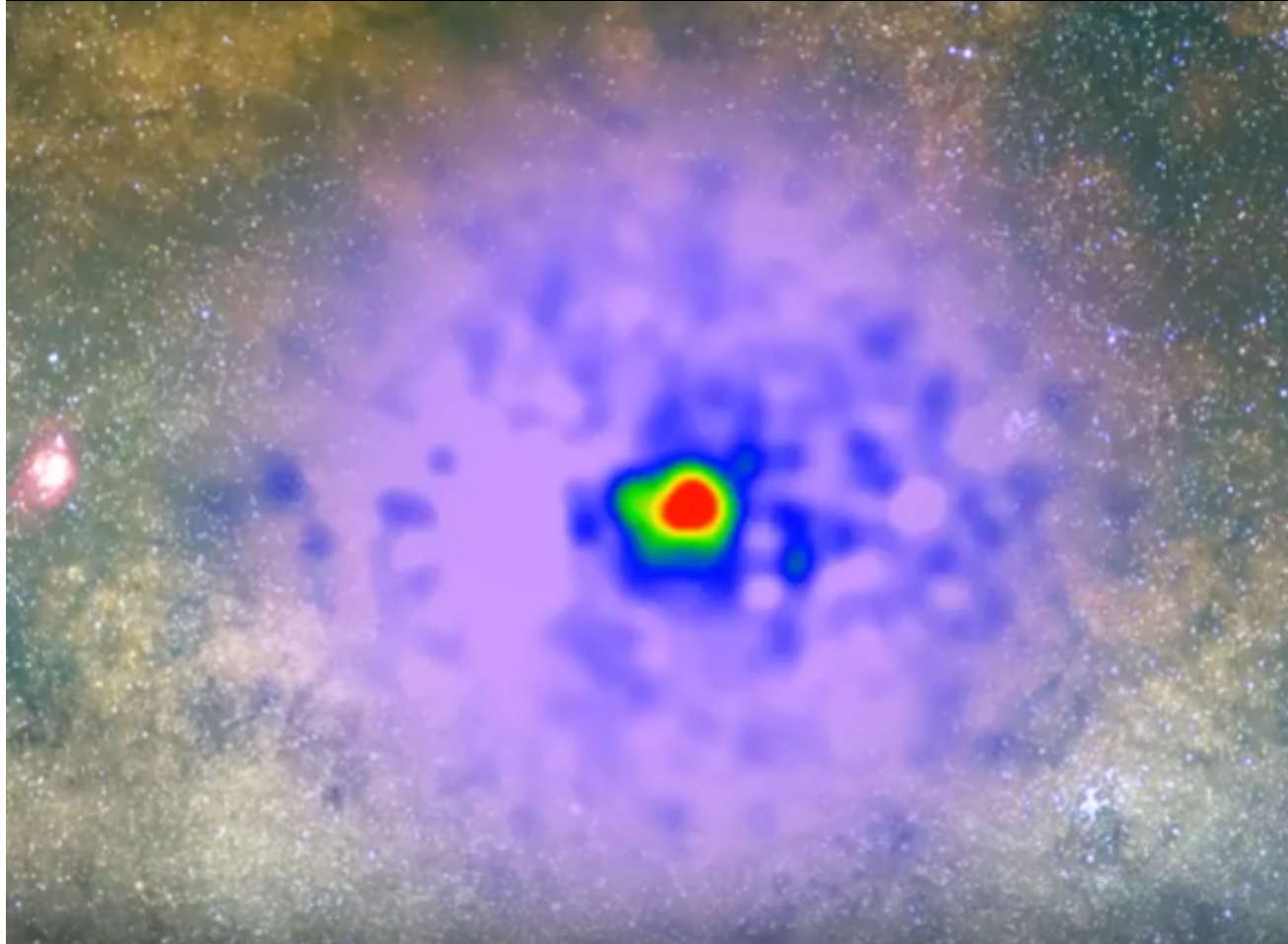
Vers la galaxie d'Andromède (M31)



# Détecter l'ombre de WIMPs

Vers la galaxie d'Andromède (M31)

# Détecter l'ombre de WIMPs



Annihilation  
de particules  
de

**matière  
noire**

?

Masse  $\sim 50$  GeV

# Détecter l'ombre de WIMPs

Concentration de l'émission dans le bulbe (étoiles vieilles)  
→ incompatible avec émission gamma de restes de supernovae  
ou de pulsars ordinaires (plutôt dans zones de formation stellaire)



Étoile à neutron

→ pulsar

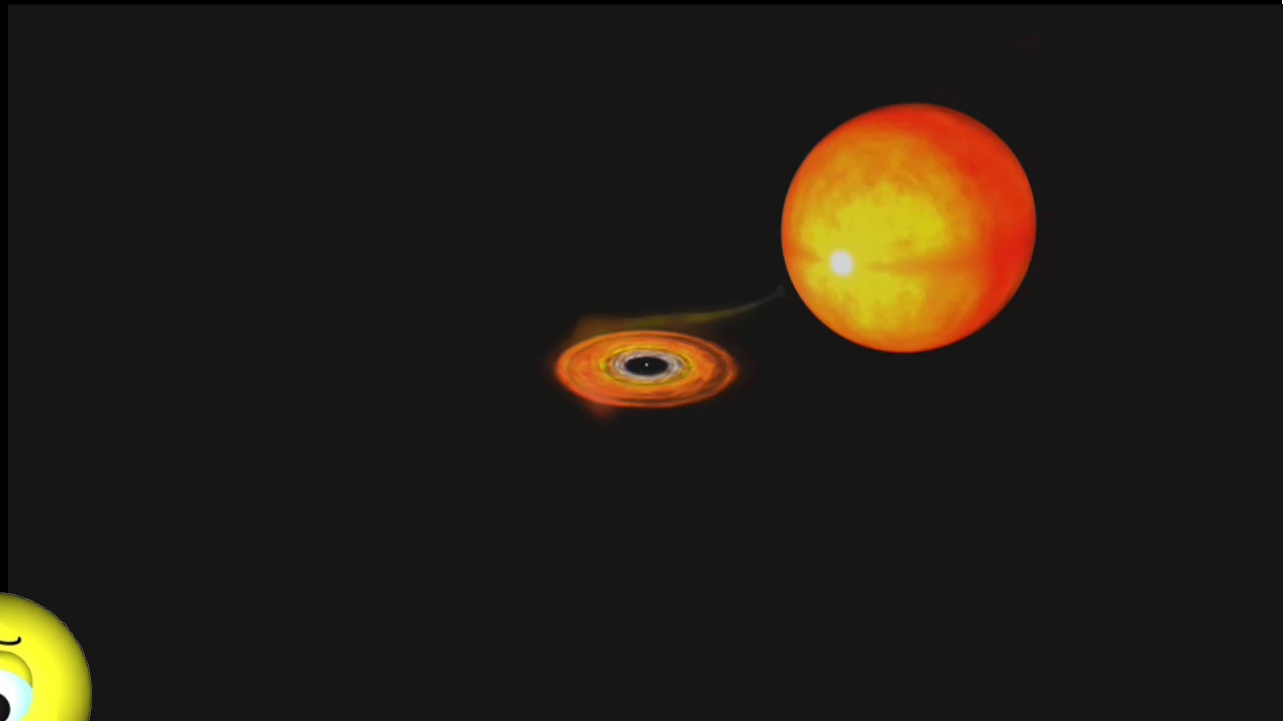
en système binaire

→ pulsar 'recyclé'

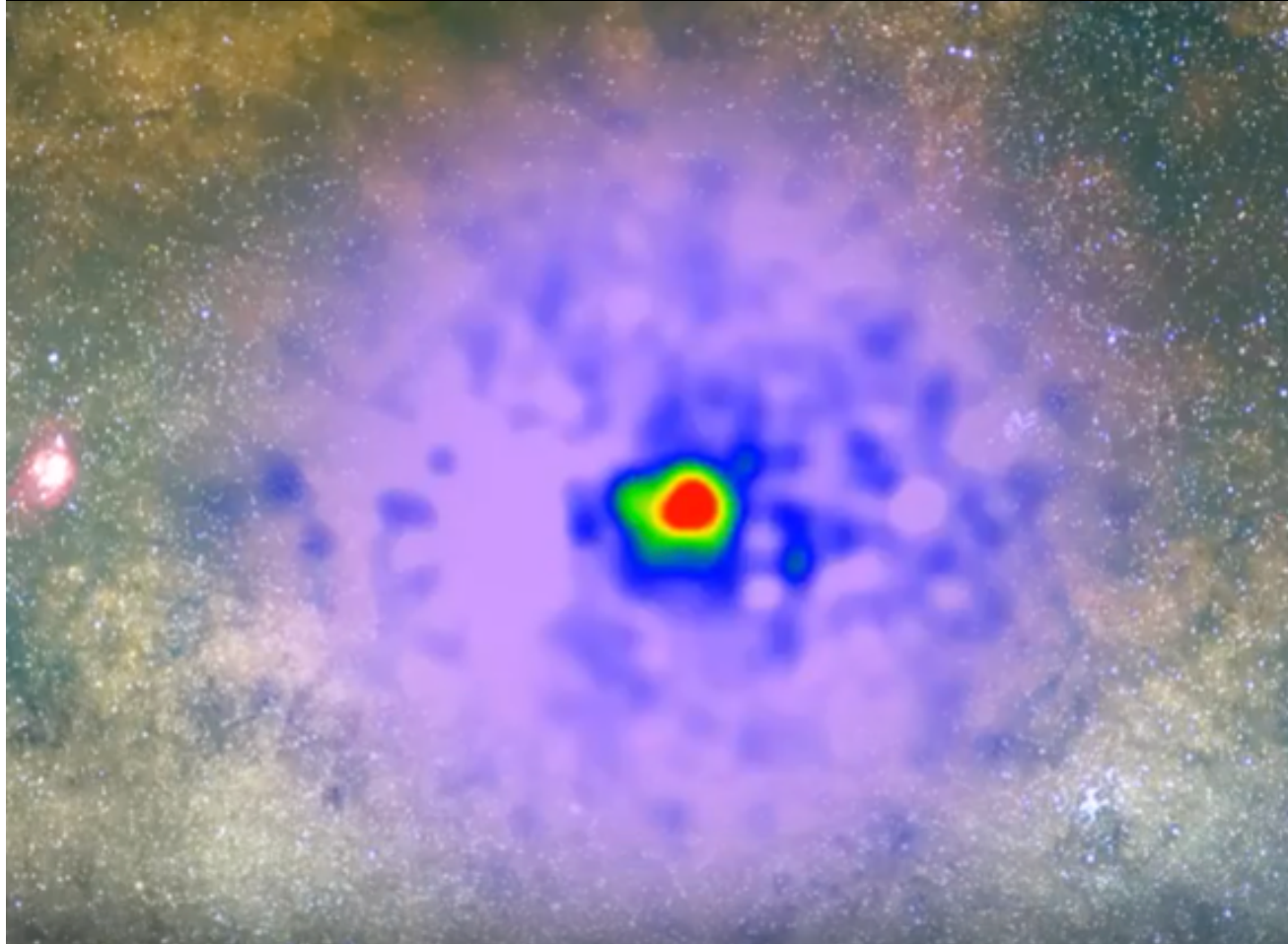
ou

pulsar milliseconde

(émission de  
rayons gamma)



# Détecter l'ombre de WIMPs



Annihilation  
de particules  
de  
**matière  
noire**  
?

ou

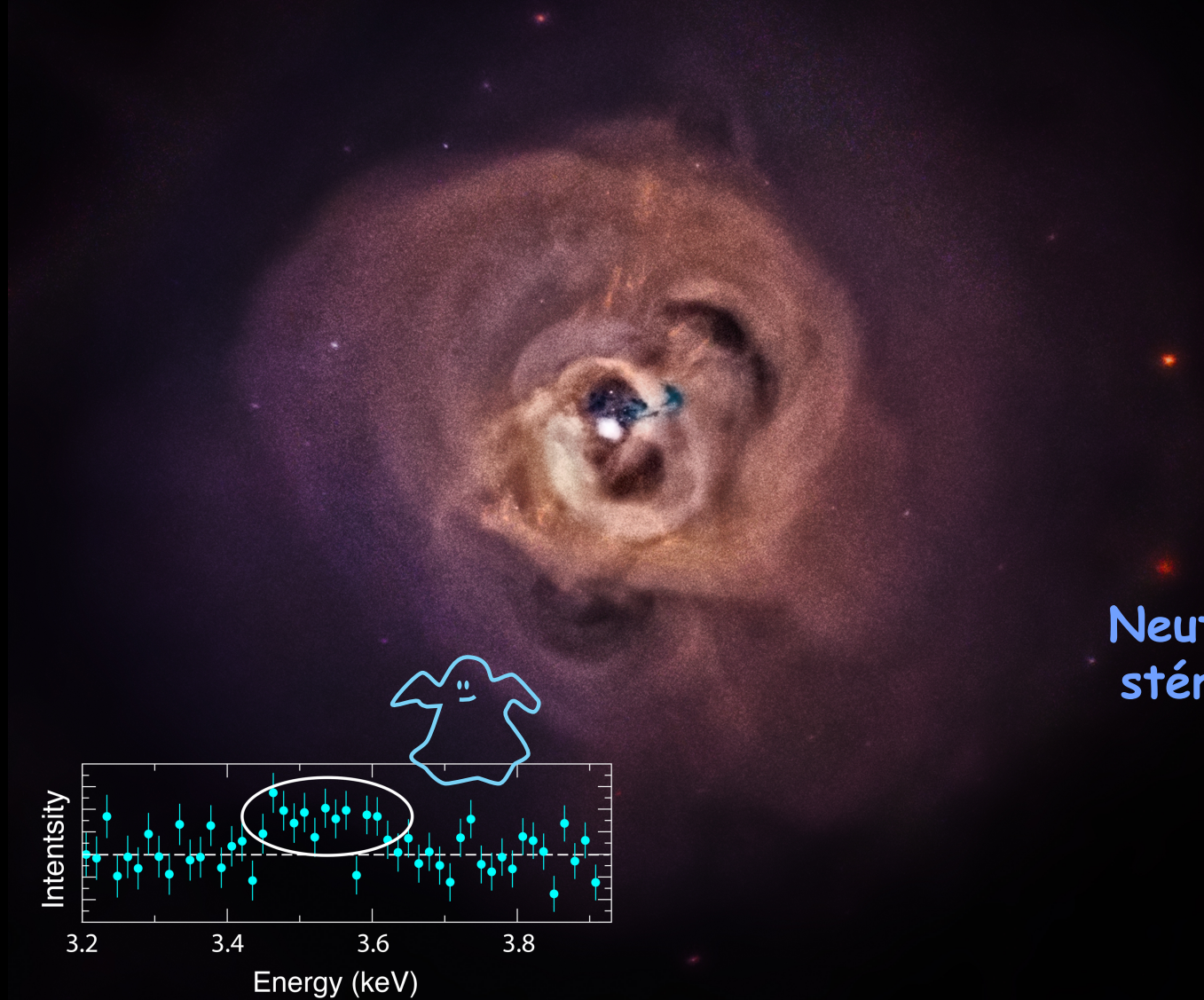
Halo diffus  
de  
**pulsars  
millisecondes**  
?

Recherche d'émission de rayons X

Amas de Persée  
(constellation du poisson)



# Détecter la matière noire



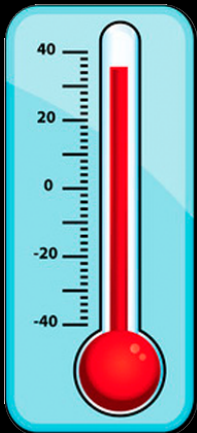
Neutrino  
stérile?



# 2 candidats pour la matière noire



## WIMP



Motivation théorique  
forte

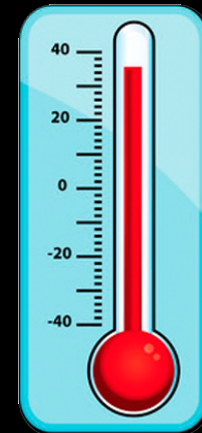
Aucune preuve directe  
de son existence

Masse ~ GeV à TeV

Lourd et peu mobile



## Neutrino stérile




Motivation théorique  
moyenne

Aucune preuve directe  
de son existence

Masse ~ keV

Léger et rapide

# Pleins feux sur la matière noire



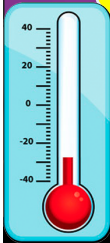
- Les faits historiques
- Les pistes  
espoirs et déconvenues ...
- **Température de la matière noire**
- Solution législative

# Température de la matière noire

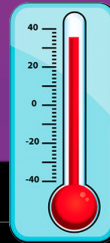
Cold Dark Matter

Warm Dark Matter

Comment les différencier?



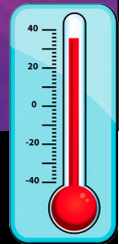
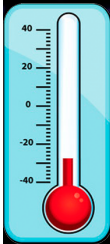
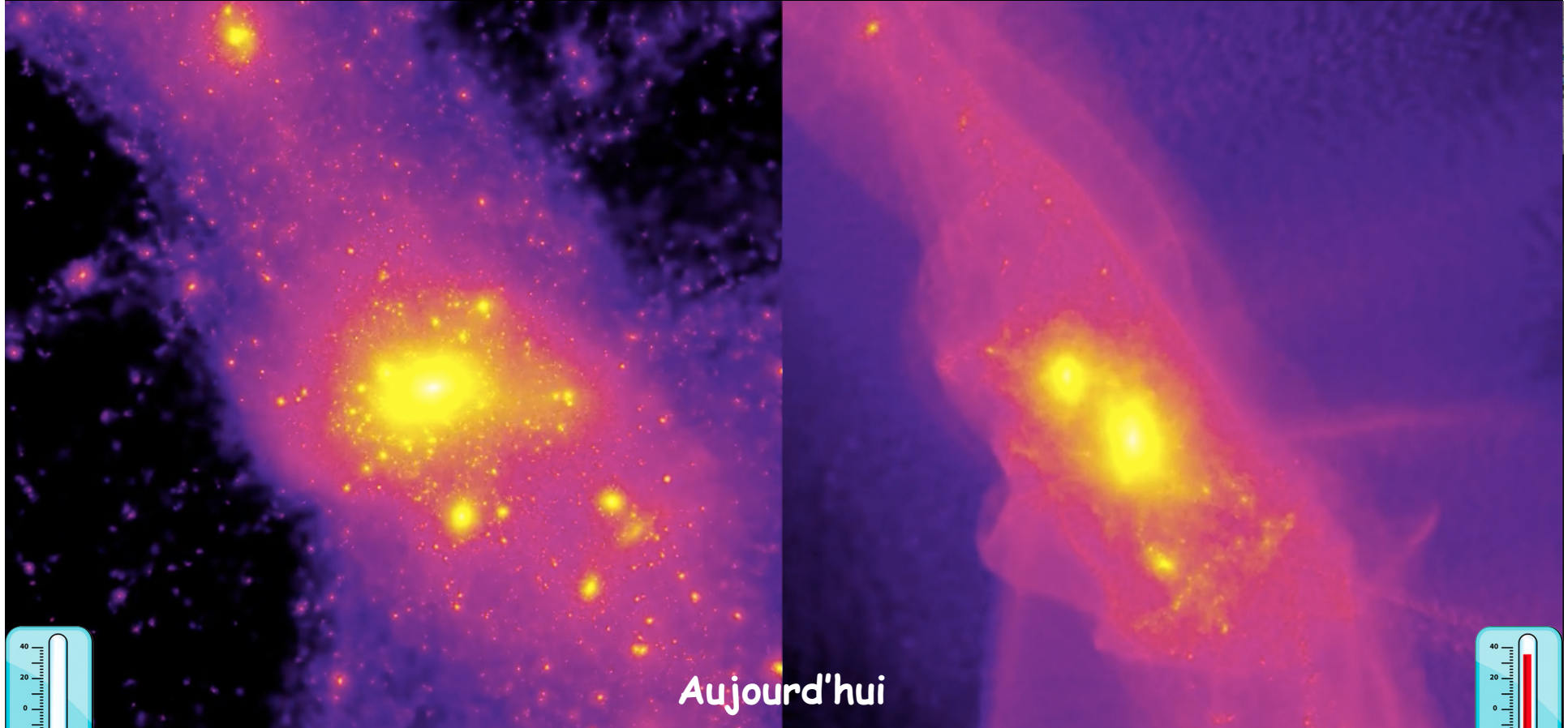
13.4 billion years ago



# Température de la matière noire

Froide

Tiède



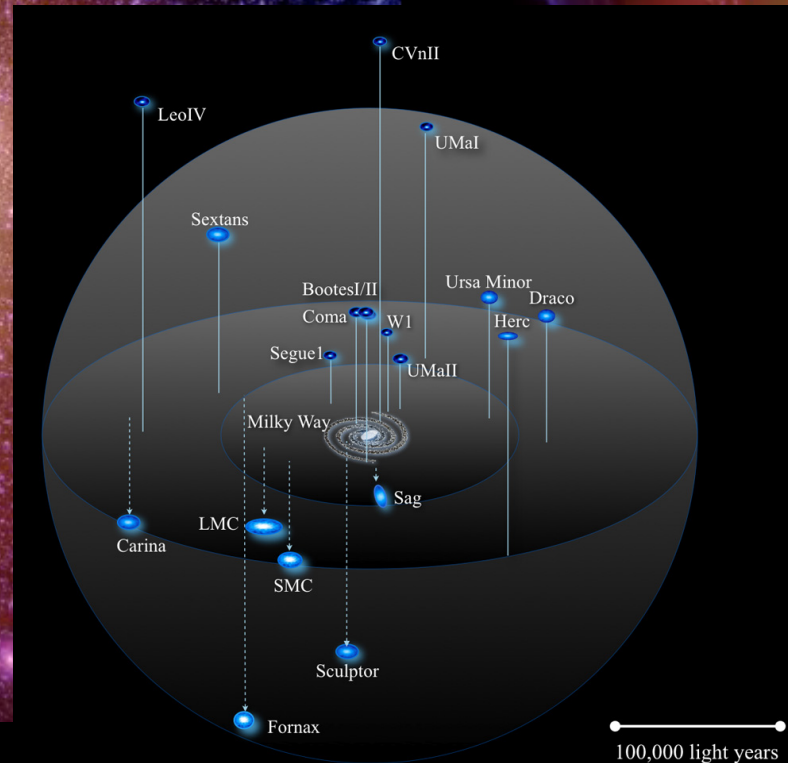
# Température de la matière noire

Froide

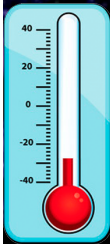
Tiède

Nombre de galaxies satellites

⇒ Compter les satellites de la Voie lactée



~50 satellites  
découverts  
à ce jour



# Carte de la matière noire



Fleurance, août 2017

# *Carte des étoiles*

Fleurance, août 2017

# Température de la matière noire

**Matière  
noire**

**Gaz**

**Etoiles**

0.00 Gyr



NIHAO project - NYUAD / MPIA



# De la difficulté de simuler la matière « ordinaire »

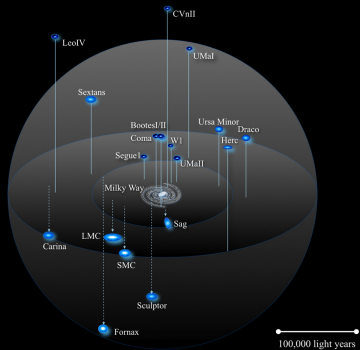
300 années-lumière  
0.2% diamètre Voie Lactée

1 particule  
10 000 masses solaires

Vents stellaires  
Ondes de choc  
Supernovae  
...

# Température de la matière noire

Nb satellites VISIBLES < nb prédit pour matière noire froide



**MAIS**



**Matière noire ≠ étoiles (ou gaz)**

**Limite observationnelle (détecté ↗)**

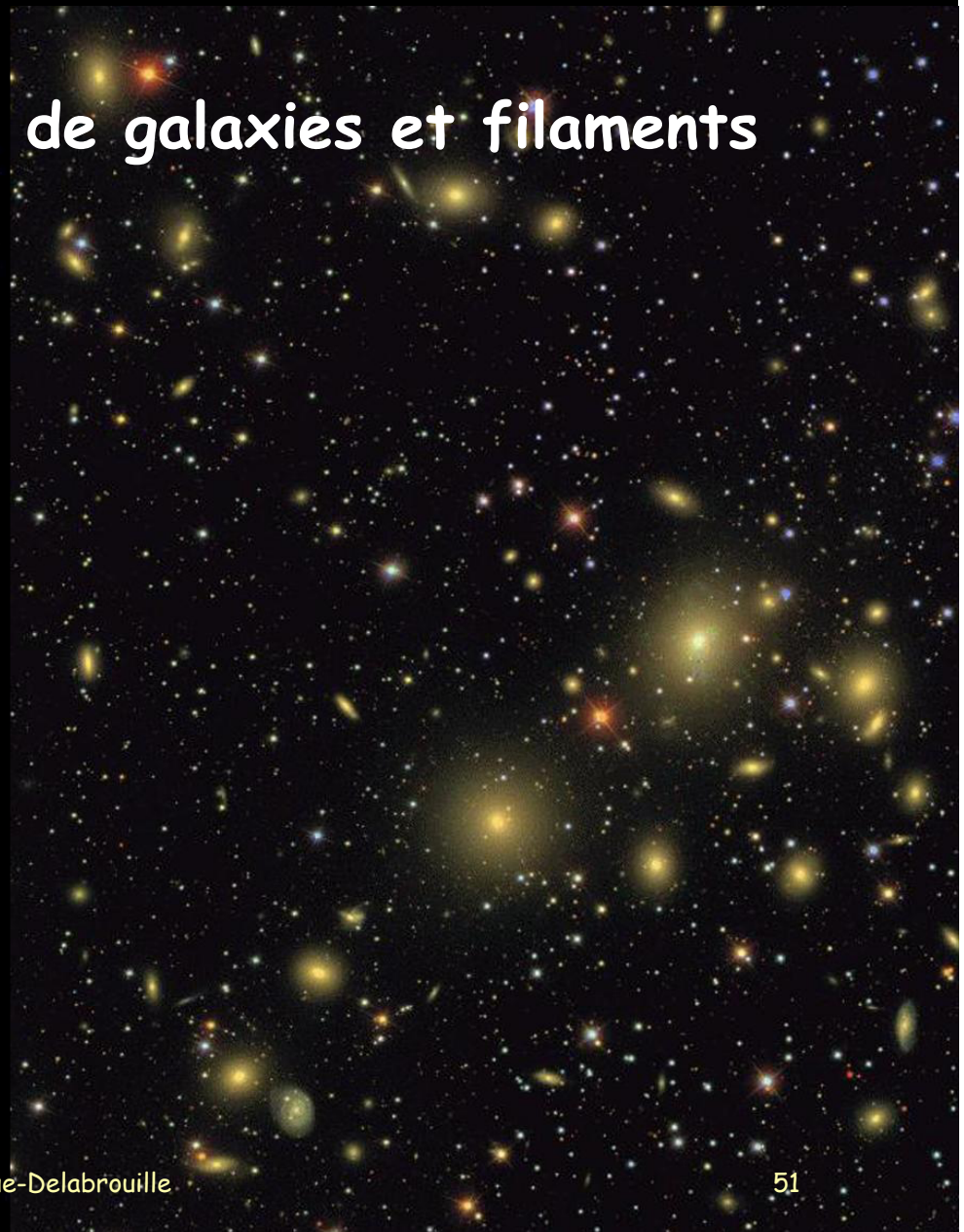
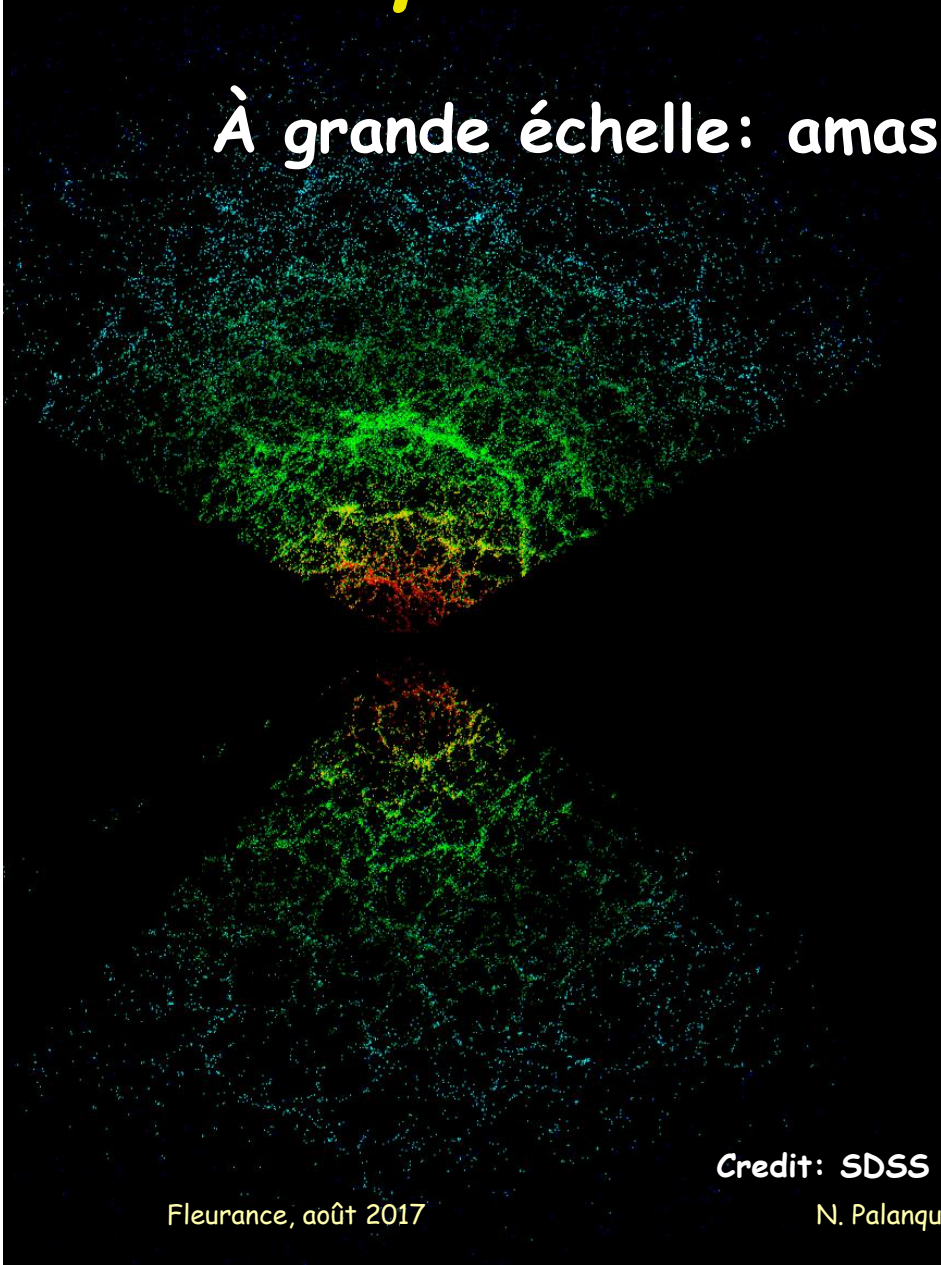
**Limite technique, phénomènes galactiques dans simulations (prédit ↘)**

**Difficile de répondre au niveau galactique**

**⇒ Regard à plus grande échelle**

# Température de la matière noire

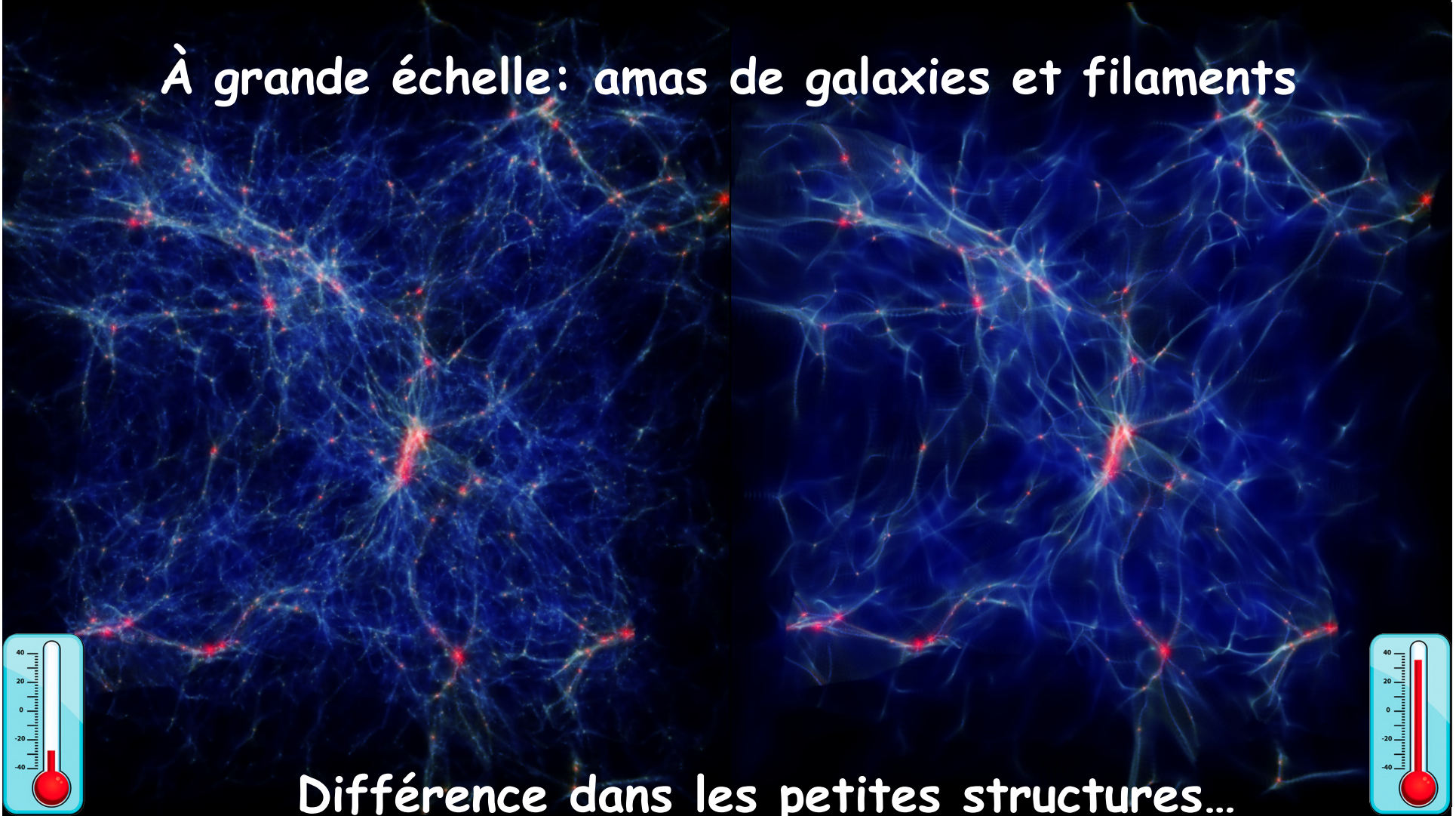
À grande échelle: amas de galaxies et filaments



Credit: SDSS

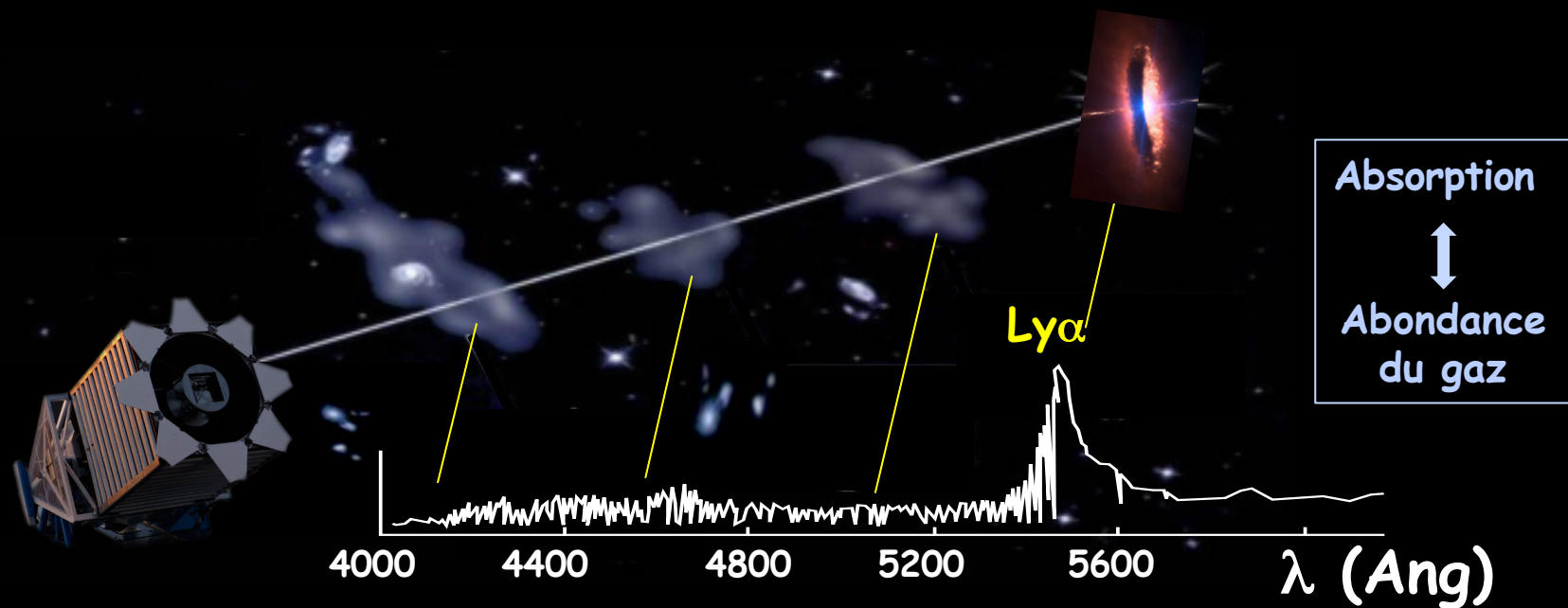
# Température de la matière noire

À grande échelle: amas de galaxies et filaments



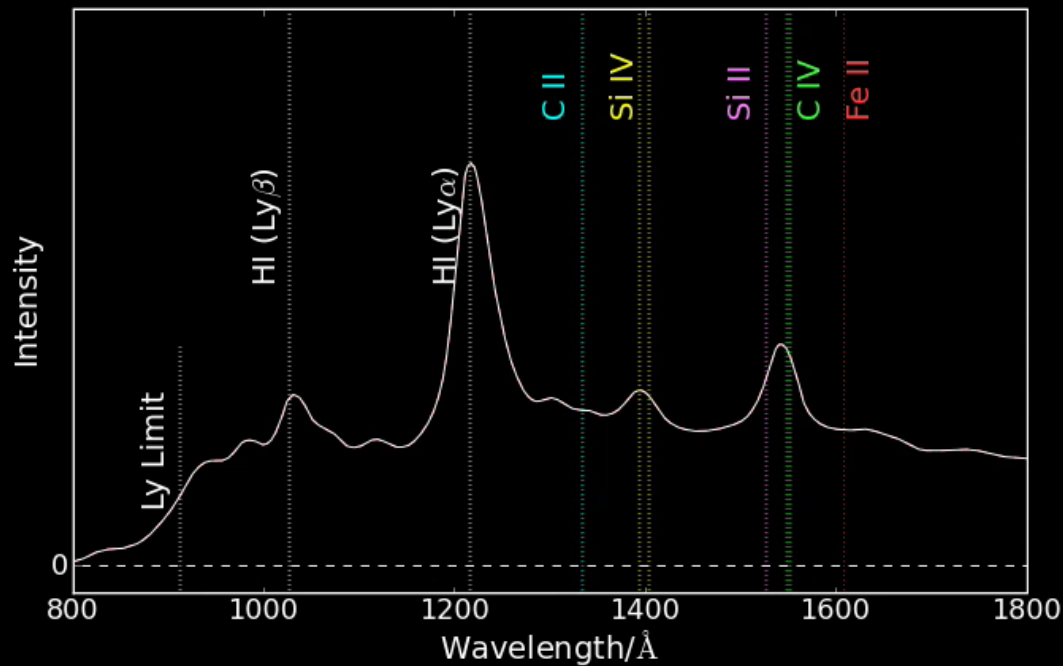
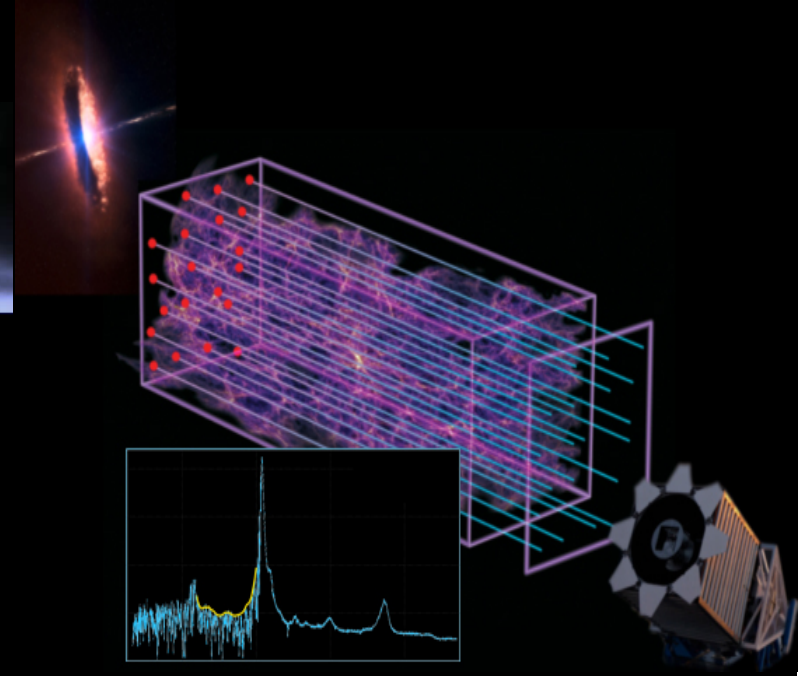
Différence dans les petites structures...

# Quasars : des phares cosmiques



Absorption Lyman- $\alpha$  à 121.6 nm  
Décalage  $\Leftrightarrow$  distance

# Quasars : des phares cosmiques

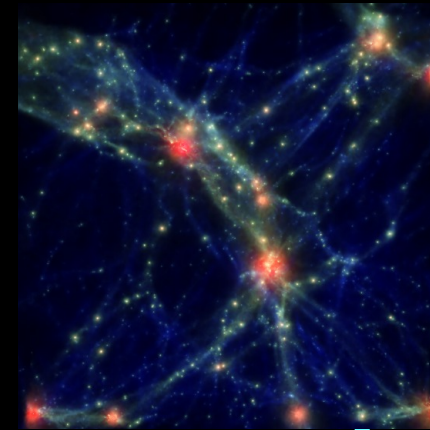
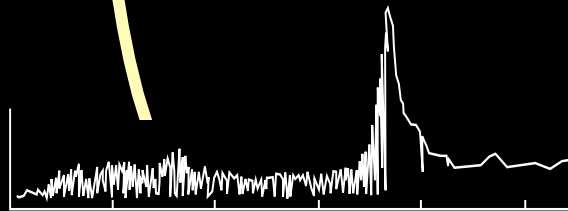


Forêt Ly $\alpha$  de  
~200.000 quasars

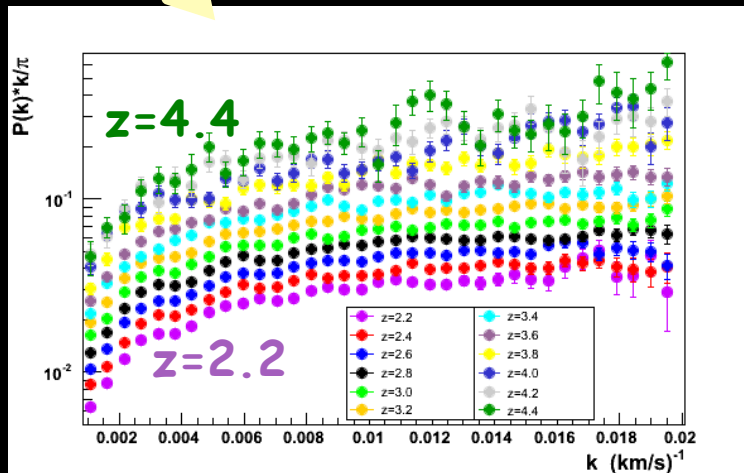


Carte 3D de  
l'Hydrogène  
intergalactique

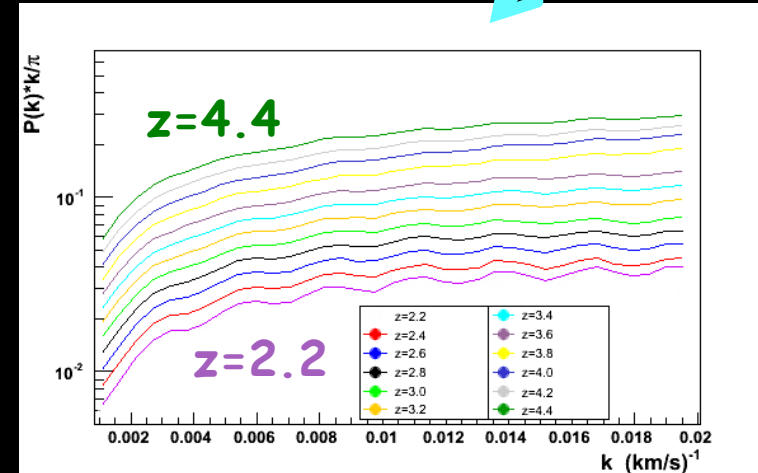
# Quasars : des phares cosmiques



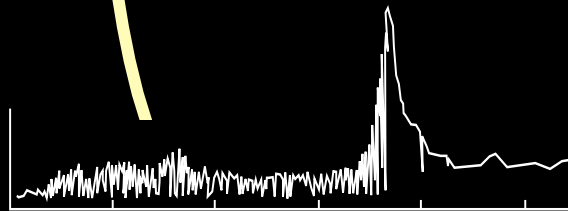
Données



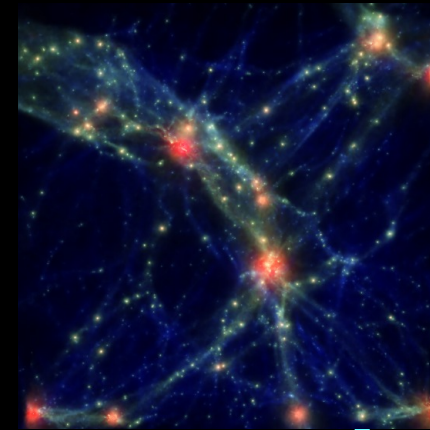
Simulations



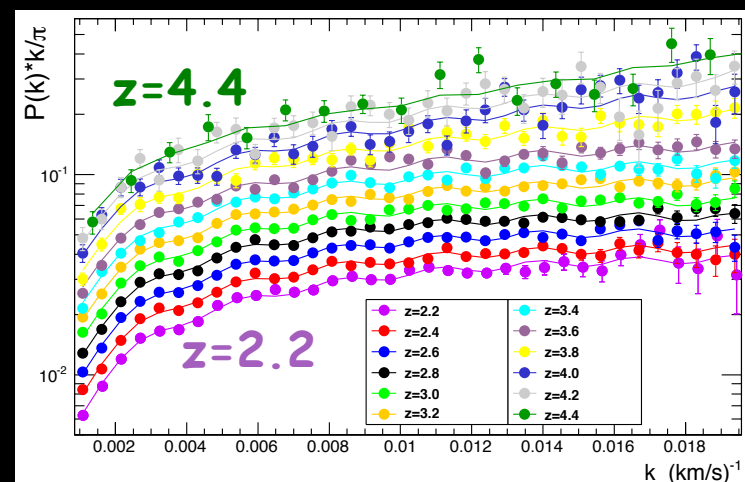
# Quasars : des phares cosmiques



Données

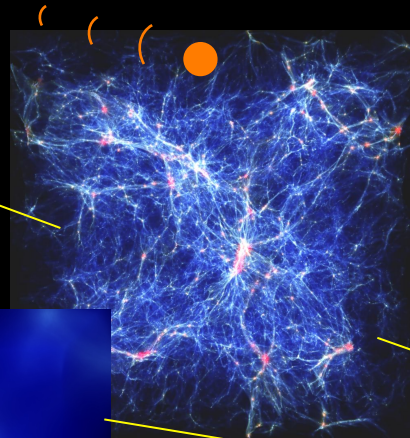
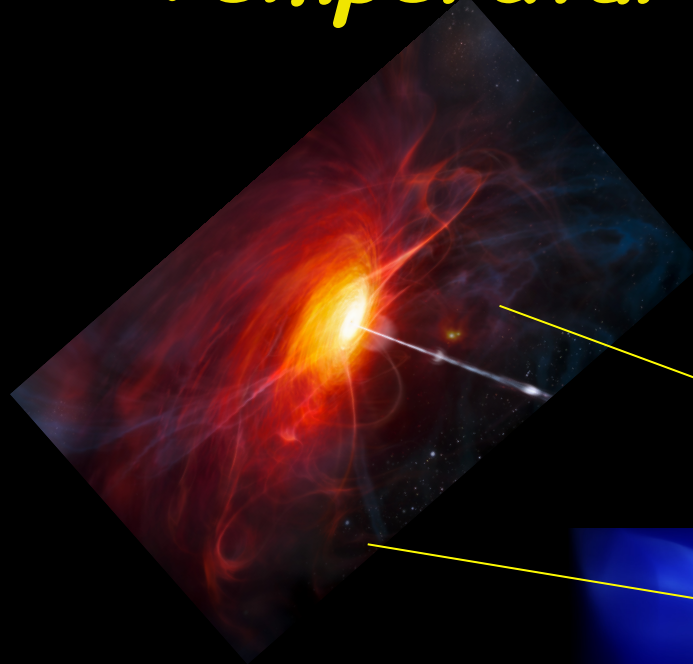


Simulations

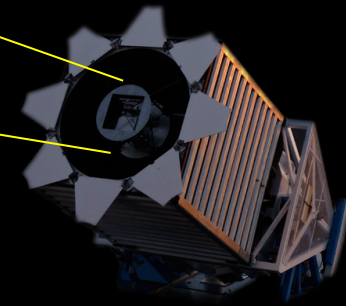




# Température de la matière noire



Très bon accord



neutrino stérile mis en difficulté  
mais pas totalement exclu...

# Pleins feux sur la matière noire

- Les faits historiques
- Les pistes  
espoirs et déconvenues ...
- Température de la matière noire
- **Solution législative**

# Solution législative

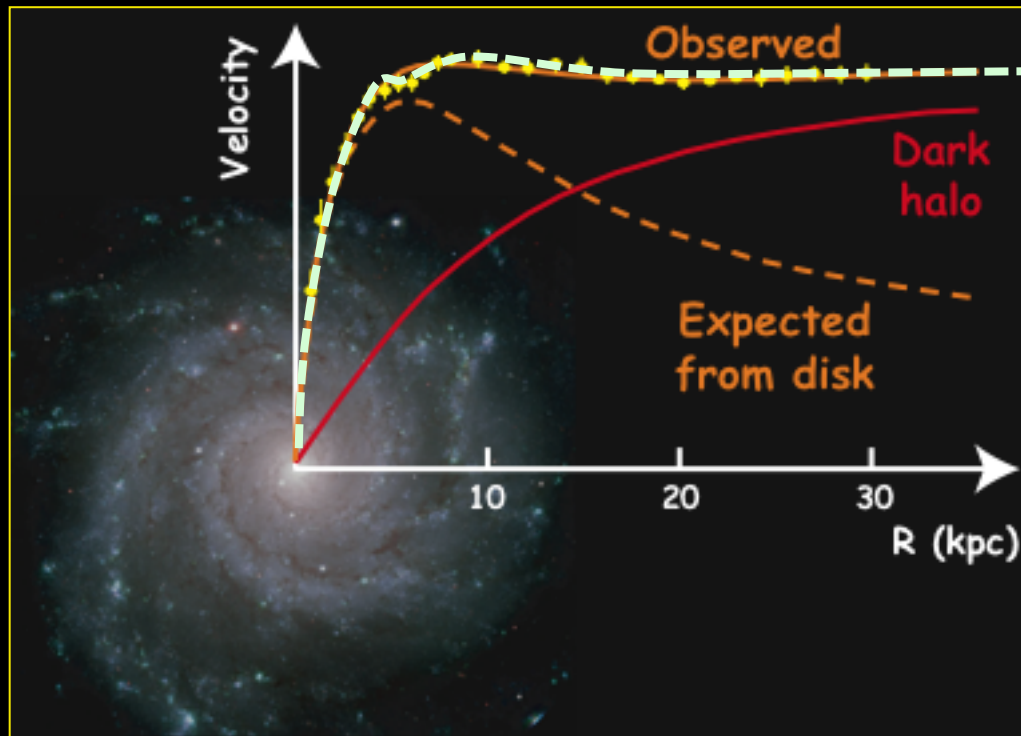
matière  
noire  
?

ou

modification  
des lois  
de la gravité  
?

# MOND ou la gravité modifiée

force de gravitation décroît moins vite  
que prévu avec R

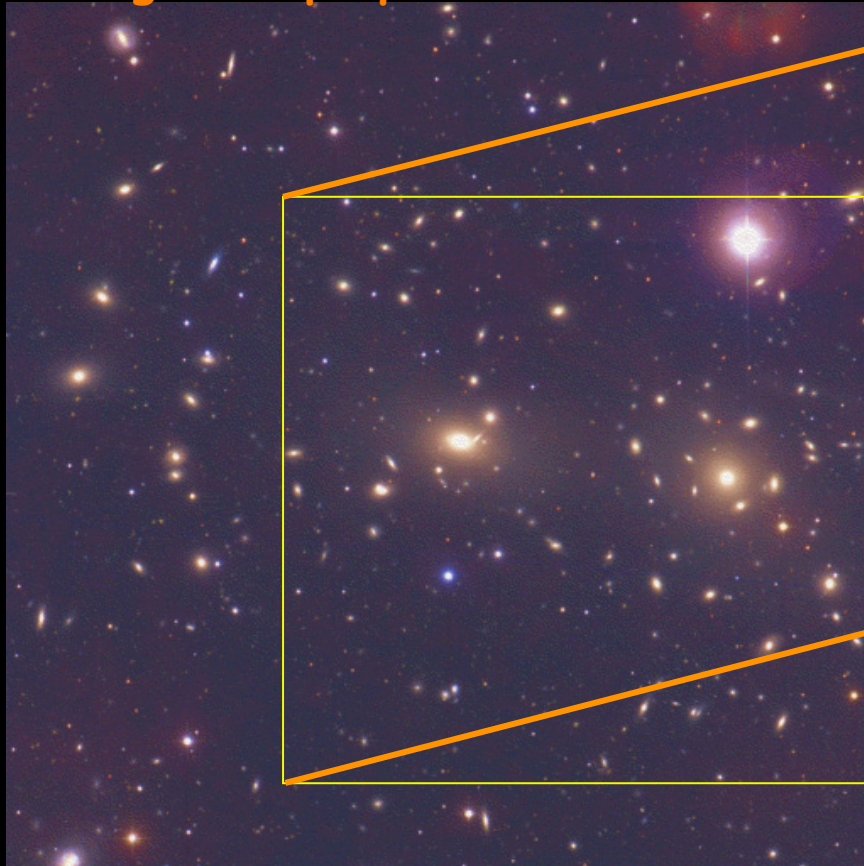


MOND



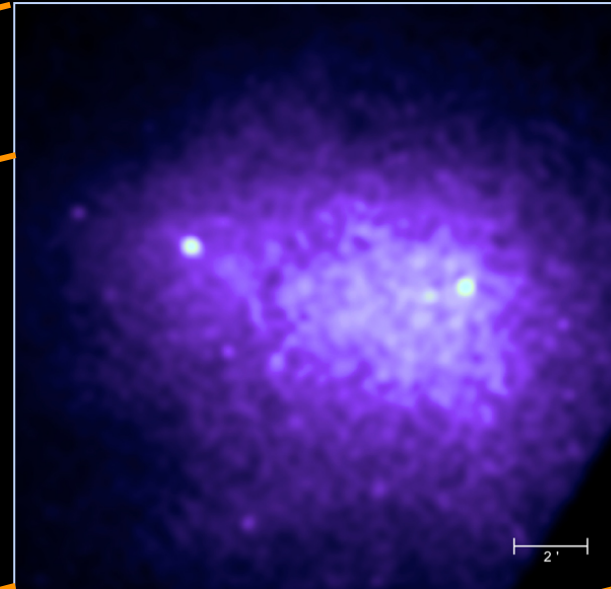
# Test: les amas de galaxies

Image en optique de l'amas de Coma



Credit: Kitt Peak

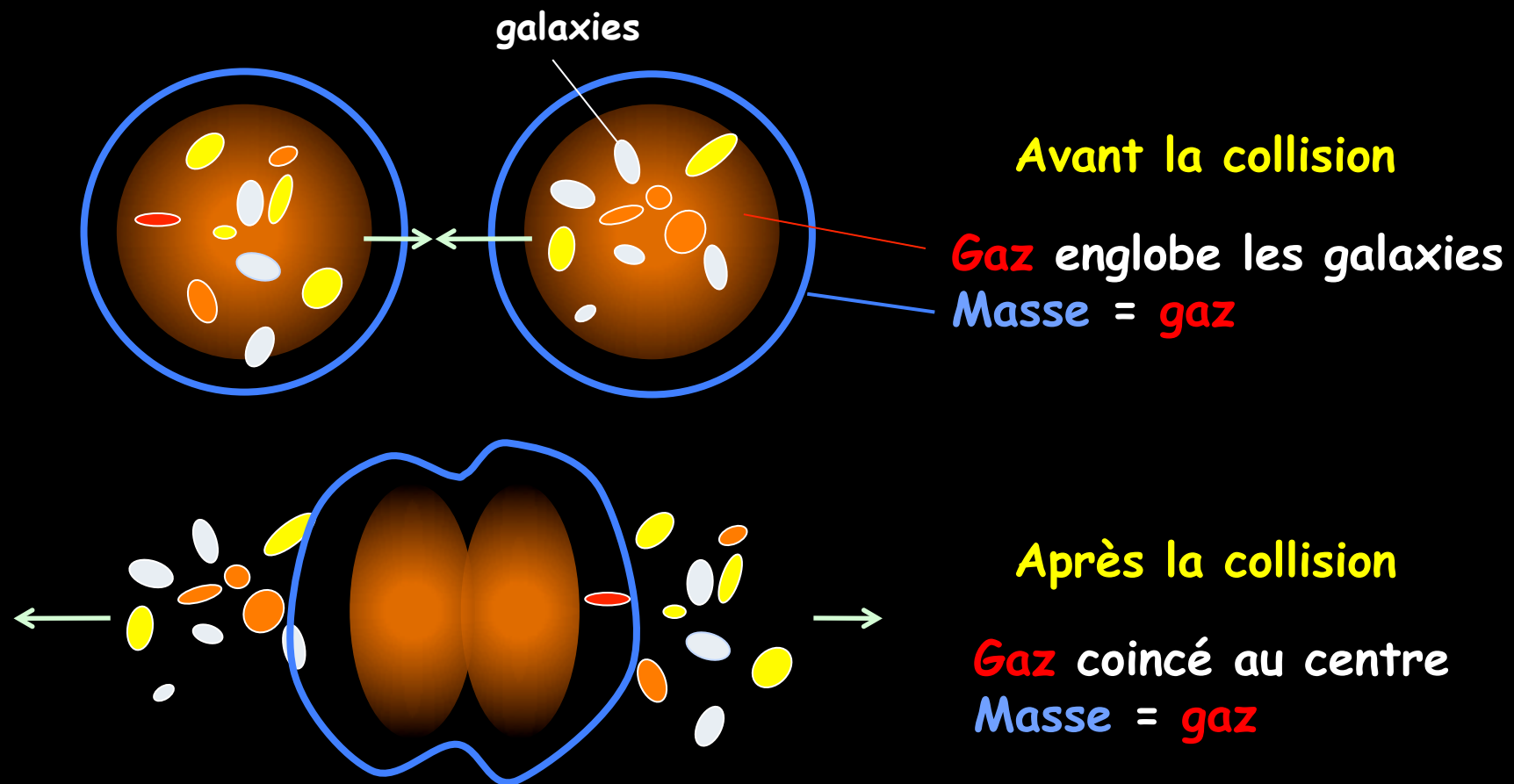
X-ray (gaz chaud intergalactique)



Credit: NASA / CHANDRA

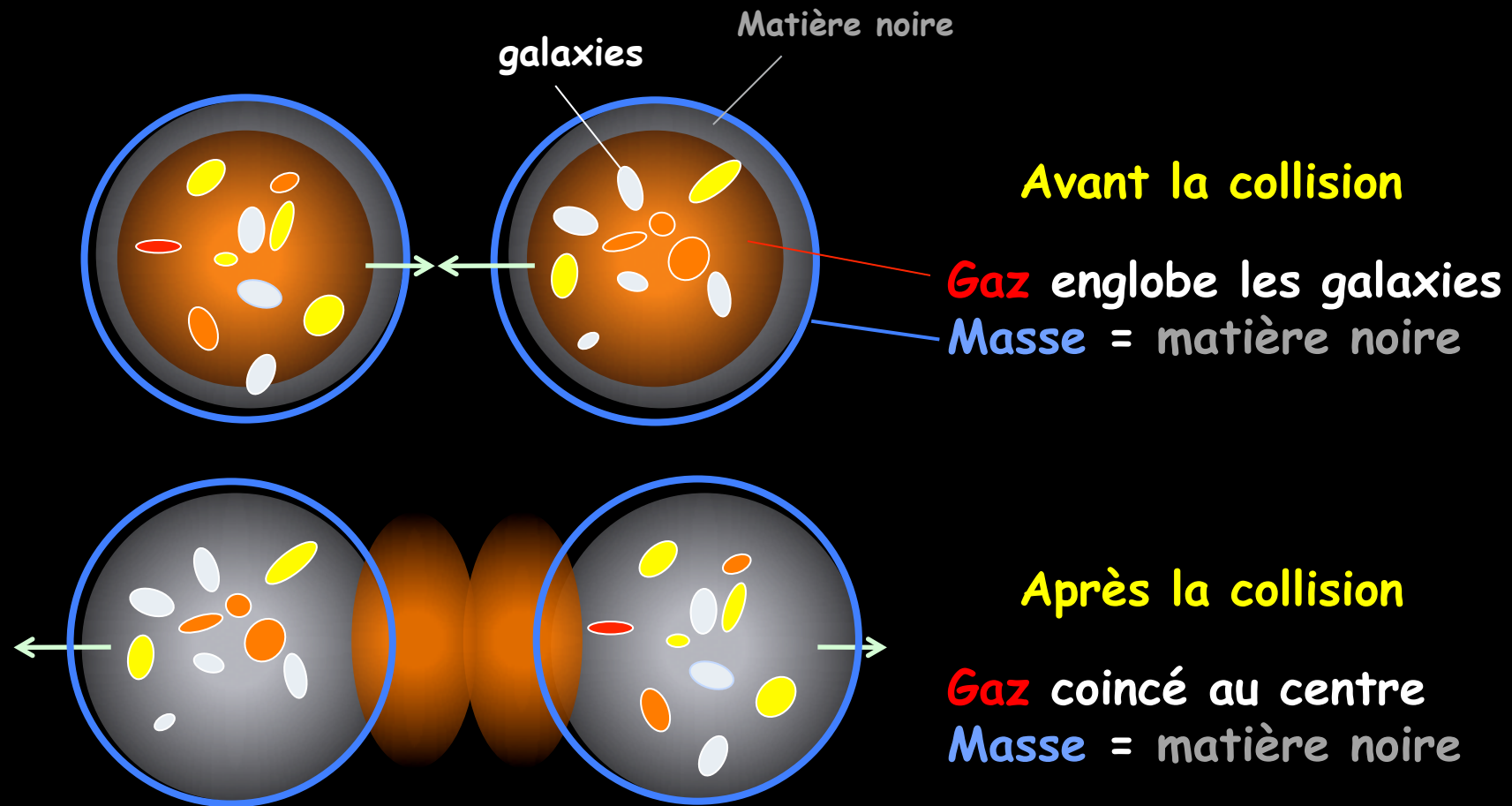
**L'essentiel de la masse d'un amas est sous forme de gaz (et non de galaxies)**

# MOND et les amas de galaxies



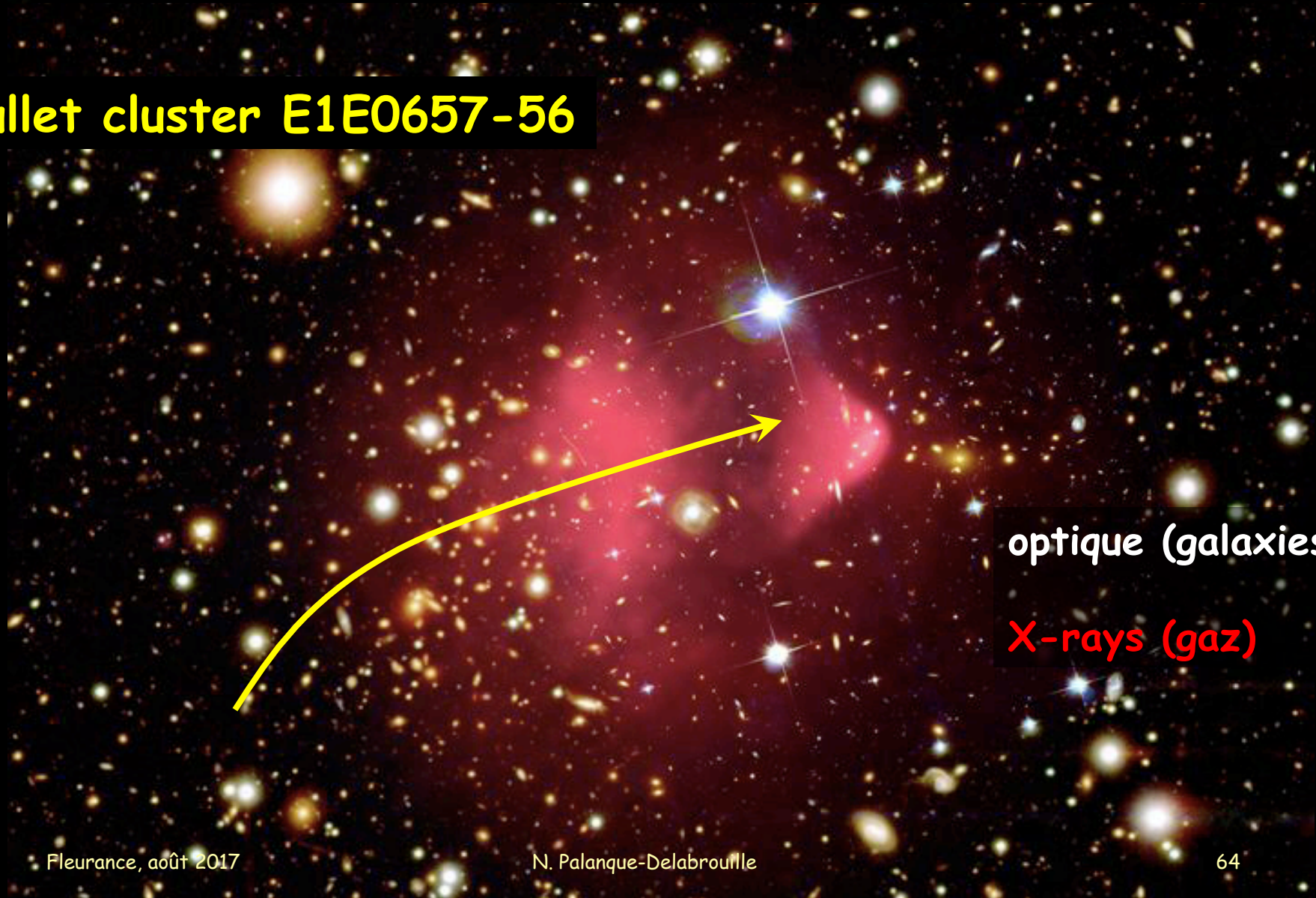
même si lois de la gravité  
sont modifiées

# Matière noire et amas de galaxies



# Collisions entre amas de galaxies

Bullet cluster E1E0657-56



optique (galaxies)

X-rays (gaz)



# MOND et les amas de galaxies

décalage entre le gaz et les contours de masse

incompatible avec  
version initiale de MOND

optique (galaxies)

X-rays (gaz)

Contour de masse

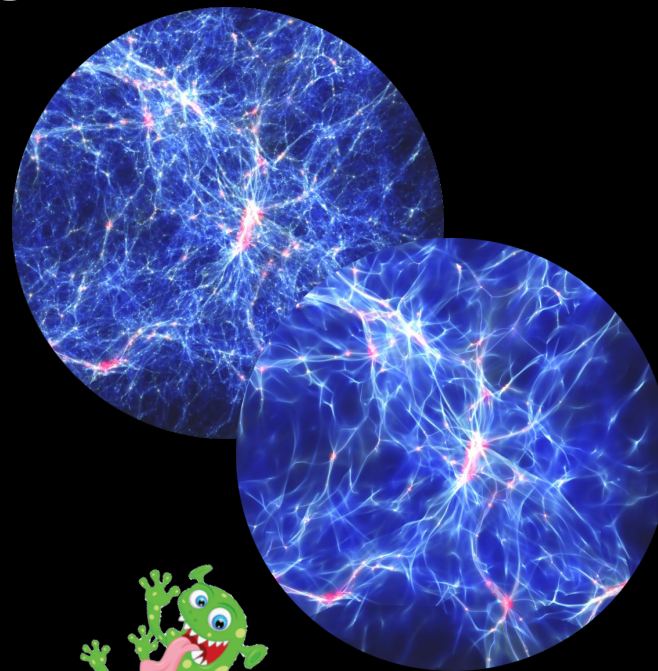
# Pleins feux sur la matière noire

La matière ordinaire ne peut tout expliquer

**95% de matière noire** (ou gravité modifiée)

Pistes sur deux candidats  
**WIMP**  
neutrino stérile

Peu probable que ce  
soit un mélange des deux ...



Prix du livre  
d'astronomie 2012

